



**ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ СВЧ-ИМПУЛЬСОВ
В ШИРОКОПОЛОСНЫХ СПИН-ВОЛНОВЫХ
И ВАКУУМНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ХАОСА
ПОД ВНЕШНИМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ***

*С. В. Гришин, Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков,
Р. А. Маньшев, В. Н. Скороходов*

Экспериментально исследована неавтономная генерация хаотических СВЧ-импульсов в широкополосных генераторах хаоса, в одном из которых хаотическая динамика обусловлена нелинейностью спин-волновой линии передачи (спин-волновой генератор хаоса), а в другом – нелинейностью ЛБВ-усилителя (шумотрон). Показано, что в обоих случаях генерация хаотических СВЧ-импульсов наблюдается при определенной мощности внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала и отстройке его несущей частоты от центральной частоты хаотического сигнала. Однако в спин-волновом генераторе хаоса, в отличие от шумотрона, регистрируется увеличение интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала в неавтономном режиме по сравнению с автономным режимом генерации за счет изменения скважности хаотических СВЧ-импульсов. Данный эффект обусловлен увеличением амплитуды хаотического сигнала в нестационарной области по сравнению со стационарной и наблюдается при трехволновом параметрическом взаимодействии спиновых волн в ферромагнитной пленке.

Ключевые слова: Генератор хаоса, хаотические СВЧ-импульсы, ЛБВ-усилитель, ферромагнитная пленка, магнитоэлектрическая волна, параметрическая неустойчивость

Введение

В настоящее время в связи с развитием теории динамического хаоса и созданием источников хаотических сигналов исследуется возможность использования динамического хаоса для передачи информации [1, 2]. Среди хаотических сигналов наиболее перспективными носителями информации в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) являются периодические последовательности импульсов с хаотическим СВЧ-заполнением, получившие в литературе название *хаотических радиоимпульсов*

*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

[1, 3]. Хаотический радио- или СВЧ-импульс представляет собой фрагмент хаотического сигнала, длительность которого превышает длину «квазипериода» хаотических колебаний [1]. Как показано в [1], отличительной особенностью хаотических радиоимпульсов от классических радиоимпульсов является независимость ширины полосы частот хаотического радиоимпульса от его длительности. Указанное обстоятельство позволяет управлять скоростью передачи информации при изменении длительности и периода следования хаотических радиоимпульсов, что особенно важно в системах связи, имеющих фиксированную полосу частот. Периодические последовательности хаотических радиоимпульсов обычно формируются за счет модуляции либо параметров генератора хаоса, например, питания усилителя мощности на биполярных транзисторах [4], либо хаотического сигнала уже на выходе генератора хаоса, например, с помощью электронных ключей [1].

Генерация периодических последовательностей хаотических СВЧ-импульсов может быть осуществлена за счет использования эффекта подавления хаоса внешним периодическим воздействием (вынужденной синхронизации). Известно, что вынужденную синхронизацию хаоса можно рассматривать как явление установления периодического режима в автоколебательной системе, работающей в режиме хаотических колебаний, под влиянием внешнего гармонического сигнала [5, 6]. Если в качестве внешнего воздействия использовать периодический сигнал, например, периодическую последовательность радиоимпульсов, то вынужденная синхронизация хаоса должна наблюдаться на тех временных интервалах, где присутствует гармонический сигнал, а на временных интервалах, где гармонический сигнал отсутствует, должна наблюдаться генерация хаотического сигнала. В этом случае во временной области будут регистрироваться чередующиеся цуги гармонических и хаотических колебаний. Для формирования хаотических СВЧ-импульсов амплитуды цугов гармонических колебаний должны быть значительно меньше, чем амплитуды цугов хаотических колебаний [7, 8].

Впервые описанный выше подход, используемый для формирования хаотических СВЧ-импульсов, был предложен и экспериментально апробирован в работах [7, 8], в которых генерация хаотического СВЧ-сигнала осуществлялась в кольцевой автоколебательной системе на основе клистронного усилителя мощности с запаздывающей обратной связью. Механизм генерации хаотического СВЧ-сигнала в такой системе обусловлен наличием падающего участка на зависимости выходной мощности от входной клистронного усилителя мощности и запаздывающей обратной связи [9, 10]¹. В качестве внешнего воздействия использовалась периодическая последовательность радиоимпульсов, подача которой в кольцо приводила к подавлению хаоса в те интервалы времени, когда внешнее воздействие присутствовало, и к генерации хаотического сигнала, когда внешнее воздействие отсутствовало. Амплитуды цугов с гармоническим СВЧ-сигналом были значительно меньше, чем амплитуды цугов с хаотическим СВЧ-сигналом, так как частота несущей импульсно-модулированного (ИМ) СВЧ-сигнала находилась на краю полосы частот клистронного усилителя, где коэффициент усиления клистрона не является максимальным.

Проведенные в последние годы экспериментальные исследования с кольцевыми автоколебательными системами на основе ферромагнитных пленок показали

¹Механизм хаотизации СВЧ-сигнала за счет наличия падающего участка на зависимости выходной мощности от входной впервые был описан для широкополосного генератора хаоса на основе ЛВВ-усилителя [11] и получил в литературе название амплитудного механизма [12–14].

возможность генерации в таких системах хаотического СВЧ-сигнала [15–29]. В отличие от известных генераторных схем, чья хаотическая динамика определяется нелинейностью усилителя мощности [1–14], в кольцевых автоколебательных системах на основе ферромагнитных пленок формирование широкополосного хаотического СВЧ-сигнала происходит за счет нелинейных волновых процессов, связанных с модуляционной или параметрической неустойчивостью магнитостатической волны (МСВ) в ферромагнитной среде. В этом случае усилитель служит, в основном, для компенсации потерь в кольце, а использование в цепи внешней обратной связи полосовых фильтров с различными характеристиками даёт возможность изменять ширину полосы частот хаотического СВЧ-сигнала относительно ширины полосы частот усилителя². Последнее обстоятельство представляет большой интерес для изучения влияния величины отстройки между хаотическим и внешним сигналами на хаотическую динамику автоколебательной системы.

Первые экспериментальные результаты по наблюдению вынужденной синхронизации хаоса под внешним периодическим воздействием в широкополосном спин-волновом генераторе хаоса были представлены в [19]. Было показано, что при определенной интенсивности внешнего гармонического СВЧ-сигнала, подаваемого на вход усилителя на GaAs полевых транзисторах и находящегося в полосе частот хаотического СВЧ-сигнала, наблюдалось полное подавление собственной хаотической динамики системы и установление периодического режима. Данный эффект наблюдался как в случае возбуждения в ферромагнитной пленке поверхностной МСВ (ПМСВ), так и обратных объемных МСВ. В [25] в качестве внешнего воздействия использовался ИМ СВЧ-сигнал, который подавался на вход широкополосного транзисторного усилителя спин-волнового генератора хаоса при возбуждении в ферромагнитной пленке ПМСВ. Здесь, в отличие от [7–10], ИМ СВЧ-сигнал находился в полосе частот усилителя мощности, но вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала и полосового фильтра, что позволяло осуществлять фильтрацию внешнего сигнала и формировать хаотические СВЧ-импульсы с сильно подавленной гармонической составляющей между ними.

В настоящей работе демонстрируется возможность формирования периодических последовательностей хаотических СВЧ-импульсов в широкополосных кольцевых автоколебательных системах на основе ЛБВ-усилителя и нелинейной спин-волновой линии передачи на ПМСВ под внешним периодическим воздействием. На основе полученных результатов проводится сравнение характеристик хаотических СВЧ-импульсов, генерируемых в широкополосных генераторах хаоса, динамика которых определяется либо нелинейностью спин-волновой линии передачи, либо нелинейностью ЛБВ-усилителя. В качестве внешнего воздействия используется ИМ СВЧ-сигнал, влияние которого на хаотический СВЧ-сигнал исследуется при различных отстройках между сигналами. Сравнение характеристик хаотических СВЧ-импульсов, формирующихся за счет различных видов нелинейности в широкополосных автоколебательных системах, позволяет выявить схожие черты и отличительные особенности в неавтономной хаотической динамике таких систем.

²Использование в цепи внешней обратной связи дополнительного полосового фильтра обусловлено тем, что фильтрующие характеристики спин-волновой линии передачи зависят от уровня мощности входного сигнала. Это приводит к «размазыванию» спектра хаотического сигнала в широкой полосе частот [19], что является нежелательным в неавтономном режиме при разделении хаотического и внешнего сигналов по частоте.

1. Экспериментальные макеты генераторов хаоса

Схемы исследуемых генераторов хаоса представлены на рис. 1. Первый макет генератора (рис. 1, *а*) состоит из последовательно соединенных в кольцо ЛБВ-усилителя, полосно-пропускающего фильтра и нелинейной спин-волновой линии передачи. Используемый в системе ЛБВ-усилитель, характеристики которого приведены на рис. 2, представляет собой широкополосный усилитель с рабочей полосой частот 2.0...5.0 ГГц и с максимальным значением коэффициента усиления $K = 31.5$ дБ на частоте $f = 3.06$ ГГц. Как следует из рис. 2, *а*, в полосе частот 2.4...3.4 ГГц коэффициент усиления ЛБВ-усилителя имеет значение $K_{\text{ЛБВ}} = 30 \pm 1.5$ дБ. На рис. 2, *б* приведена зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ от входной $P_{\text{вх}}$ ЛБВ-усилителя, измеренная с помощью анализатора цепей на частоте $f = 2.8$ ГГц в режиме свипирования мощности. Из представленных на рис. 2, *б* результатов следует, что в линейном режим $K_{\text{ЛБВ}} = 30$ дБ, а при $P_{\text{вх}} = 0$ дБмВт начинается нелинейный режим работы ЛБВ-усилителя, обусловленный перегруппировкой электронов в пучке. Это приводит к уменьшению коэффициента усиления и к насыщению уровня выходной мощности до $P_{\text{вых}} = +33$ дБмВт при $P_{\text{вх}} = +13$ дБмВт. При $P_{\text{вх}} > +13$ дБмВт у зависимости $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ наблюдается участок с отрицательным наклоном, наличие которого, как известно [11–14], обуславливает амплитудный механизм хаотизации сигнала в кольце. Однако в исследуемом спин-волновом

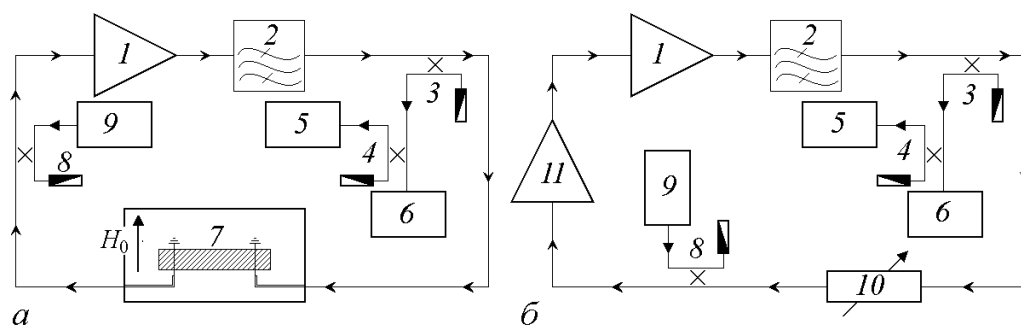


Рис. 1. Блок-схемы экспериментальных макетов: *а* – спин-волнового генератора хаоса; *б* – шумотрона. 1 – ЛБВ-усилитель, 2 – полосно-пропускающий фильтр, 3, 4, 8 – направленные ответвители, 5 – анализатор спектра, 6 – осциллограф, 7 – нелинейная спин-волновая линия передачи, 9 – генератор внешнего сигнала, 10 – переменный аттенюатор, 11 – транзисторный усилитель

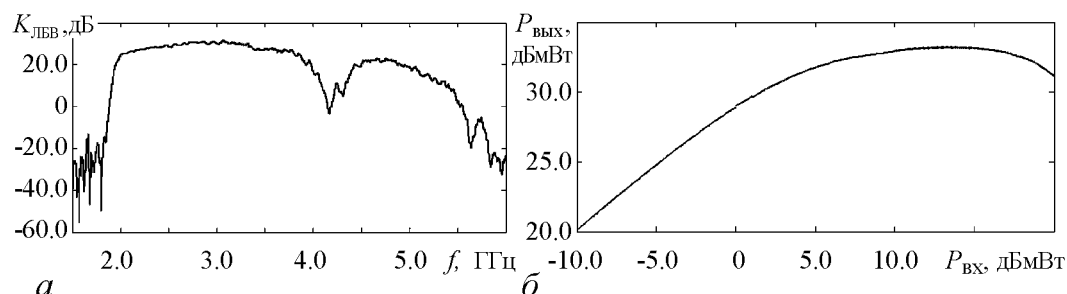


Рис. 2. Характеристики ЛБВ-усилителя, измеренные при токе пучка $I = 60$ мА и ускоряющем напряжении $U = 2550$ В: *а* – зависимость коэффициента усиления $K_{\text{ЛБВ}}$ от частоты f ; *б* – зависимость выходной мощности от входной мощности, измеренная на частоте $f = 2.8$ ГГц

генераторе в случае автономной генерации хаотического СВЧ-сигнала ЛБВ-усилитель работает в линейном режиме и служит, в основном, для компенсации потерь в кольце.

Нелинейная спин-волновая линия передачи имеет конфигурацию линии задержки с двумя (входным и выходным) полосковыми проводниками шириной 30 мкм, расстояние между которыми устанавливается равным 6 мм. Пленка железитриевого граната накладывается поверх проводников и имеет геометрические размеры $4.5 \times 10 \times 0.021$ мм, намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1760$ Гс и полуширину линии ферромагнитного резонанса $\Delta H = 0.49$ Э. Внешнее постоянное магнитное поле $H_0 = 370$ Э направлено параллельно проводникам и подбирается таким образом, чтобы в пленке возбуждалась ПМСВ на частотах ниже 4 ГГц, где параметрические процессы первого порядка для ПМСВ разрешены. Для формирования хаотического СВЧ-сигнала в заданной полосе частот используется микрополосковый полосно-пропускающий фильтр. Данный фильтр имеет в полосе пропускания минимальный уровень ослабления $A_0 = -4$ дБ на частоте $f_0 = 3$ ГГц, ширину полосы частот по уровню 3 дБ $\Delta f_{3\text{дБ}} = 1.03$ ГГц, по уровню 20 дБ $\Delta f_{20\text{дБ}} = 1.3$ ГГц и по уровню 40 дБ $\Delta f_{40\text{дБ}} = 1.91$ ГГц.

Основная часть мощности с выхода ЛБВ-усилителя возвращается обратно в кольцо, а меньшая часть мощности через направленные ответвители 3 и 4 поступает на осциллограф реального времени и анализатор спектра. Внешний СВЧ-сигнал от генератора 9 заводится в кольцо на вход ЛБВ-усилителя через направленный ответвитель 8.

Второй макет генератора хаоса (рис. 1, б) собран на основе схемы шумотрона [11,12] и представляет собой последовательно соединенные в кольцо два широкополосных усилителя, полосно-пропускающий фильтр и переменный аттенюатор. Один из усилителей, усилитель на GaAs полевых транзисторах, является линейным, а другой, ЛБВ-усилитель, является нелинейным и работает на участке с отрицательным наклоном зависимости $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ [11]. Переменный аттенюатор обеспечивает работу твердотельного усилителя в линейном режиме. Транзисторный усилитель имеет в полосе частот 1.8...4.0 ГГц коэффициент усиления в линейном режиме $K_{\text{тр}} = 38.5$ дБ и уровень мощности насыщения $P_{\text{нас}} = +32.5$ дБмВт при $P_{\text{вх}} = 0$ дБмВт. Внешний СВЧ-сигнал от генератора 9 подается на вход транзисторного усилителя через направленный ответвитель 8.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Спин-волновой генератор хаоса. Хаотическая динамика спин-волнового генератора хаоса определяется нелинейностью спин-волновой линии передачи и связана с параметрическим взаимодействием ПМСВ с коротковолновыми спиновыми волнами. Нелинейный режим работы спин-волновой линии передачи начинается при превышении генерируемым в системе сигналом некоторого порогового значения. Уровень мощности сигнала в кольце зависит от коэффициента усиления кольца $G = K_{\text{ЛБВ}} - A$ (A – общий уровень потерь в кольце) и подбирается путем увеличения тока пучка ЛБВ-усилителя. При мощности СВЧ-сигнала в кольце больше порогового значения ПМСВ начинает параметрически возбуждать тепловые спиновые волны,

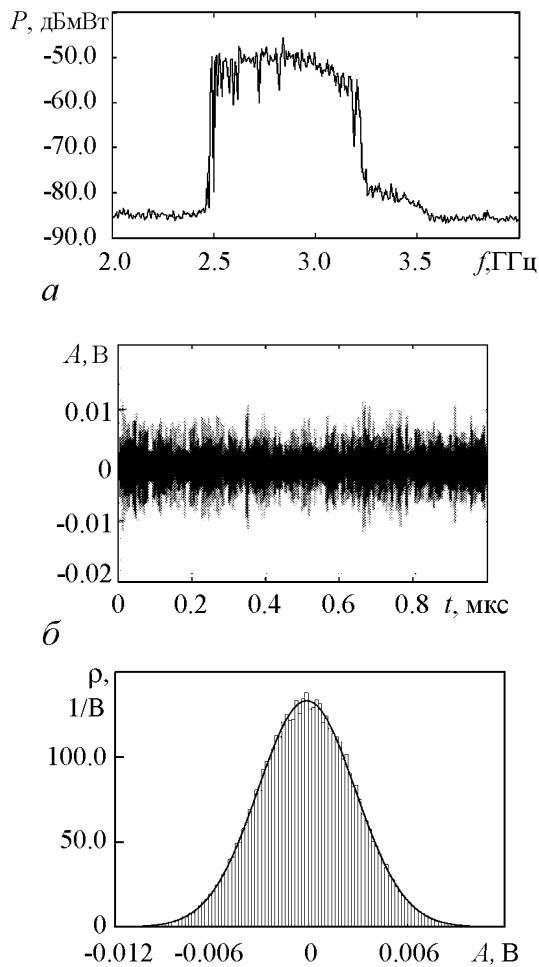


Рис. 3. Спектр мощности (а), временная реализация (б) и распределение плотности вероятностей (в) хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого спин-волновым генератором хаоса в автономном режиме. Сплошной линией на (в) показан гауссов закон распределения, рассчитанный с использованием выражения (1) при $m = -0.00019$ и $\sigma = 0.003$

Из представленных на рис. 3 результатов следует, что ширина спектра мощности хаотического СВЧ-сигнала по уровню его шумоподобного пьедестала определяется шириной полосы возбуждения ПМСВ и полосовыми свойствами микрополоскового фильтра и составляет величину порядка 700 МГц. На рис. 3, в приведена гистограмма, полученная на основе статистической обработки временного ряда (см. рис. 3, б), которая при большом числе n мгновенных значений сигнала ($n \sim 10^6$) соответствует распределению плотности вероятностей мгновенных значений напряжения A СВЧ-сигнала. На рис. 3, в также приведена кривая, описывающая гауссов закон распределения плотности вероятностей, который имеет следующий вид:

$$\rho(A) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(A-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

которые вблизи порогового значения имеют отстройки от половинного значения частоты ПМСВ порядка десятков или сотен килогерц [2,28–32]. Формирование спин-волновых пакетов приводит к модуляции амплитуды ПМСВ по случайному закону и к хаотизации сигнала в кольце [15–19,28,29]. Данный механизм хаотизации СВЧ-сигнала является узкополосным и наблюдается в полосе частот 10...15 МГц одной из собственных мод кольцевой автоколебательной системы. Параметрический распад ПМСВ на спиновые волны приводит также к возникновению дополнительных нелинейных потерь у ПМСВ и к образованию падающего участка на зависимости $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ спин-волновой линии передачи. Наличие падающего участка наблюдается в сильно запороговом режиме, обуславливает появление дополнительных спектральных составляющих между кольцевыми модами автогенератора, что совместно с сильной фазовой нелинейностью спин-волновой линии передачи приводит к перекрытию спектров кольцевых мод и к генерации широкополосного хаотического СВЧ-сигнала [19,24].

На рис. 3, а, б приведены спектр мощности и временная реализация хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в автономном режиме при $G = 10$ дБ. Из представленных на рис. 3 результа-

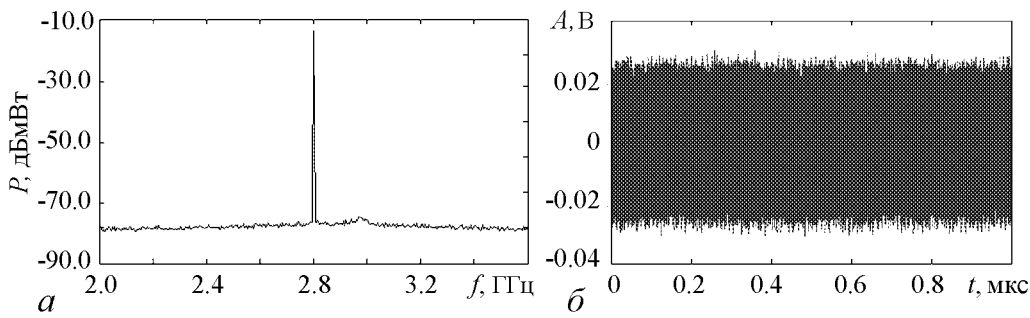


Рис. 4. Спектр мощности (а) и временная реализация (б) сигнала, генерируемого спин-волновым генератором хаоса в неавтономном режиме под воздействием внешнего гармонического СВЧ-сигнала с частотой $f_{\text{вн}} = 2.8$ ГГц и мощностью $P_{\text{вн}} = +10.4$ дБмВт

где m – среднее, σ^2 – дисперсия. Кривая построена по значениям среднего и дисперсии, полученным на основе анализа гистограммы временного ряда. Из сравнения законов распределения вероятностей следует, что генерируемый в автономном режиме широкополосный хаотический СВЧ-сигнал имеет закон распределения плотности вероятностей, близкий к нормальному.

Для исследования эффекта вынужденной синхронизации хаоса в качестве внешнего воздействия используется гармонический СВЧ-сигнал, который подается на вход ЛБВ-усилителя вначале на частоте, находящейся в полосе частот хаотического сигнала, а затем вне его полосы. На рис. 4 приведены спектр мощности и временная реализация генерируемого в системе сигнала, полученные при $G = 10$ дБ и частоте внешнего гармонического сигнала $f_{\text{вн}} = 2.8$ ГГц, находящейся вблизи центральной частоты хаотического сигнала $f_{\text{ц}} = 2.85$ ГГц. Из представленных на рис. 4 результатов следует, что полное подавление хаотической динамики системы наблюдается тогда, когда мощность гармонического сигнала, подаваемая на вход ЛБВ-усилителя, соответствует входной мощности, при которой ЛБВ-усилитель работает в режиме насыщения выходной мощности (см. рис. 2, б). В этом случае в частотной и во временной областях наблюдается только гармонический СВЧ-сигнал, частота которого соответствует частоте внешнего воздействия.

На рис. 5 приведена зависимость порогового уровня мощности гармонического СВЧ-сигнала, при котором наблюдается полное подавление хаотической динамики системы, от отстройки частоты внешнего гармонического сигнала от центральной частоты хаотического сигнала. Видно, что наименьший пороговый уровень мощности внешнего гармонического СВЧ-сигнала $P_{\text{вн}} = +7.6$ дБмВт соответствует центральной частоте полосового фильтра ($f = 3$ ГГц), на которой величина спектральной мощности хаотического СВЧ-сигнала не является максимальной. Увеличение отстройки внешнего сигнала от этой частоты приводит к увеличению порогового уровня мощности гармонического сигнала. Это увеличение наблюдается как при перестройке гармонического

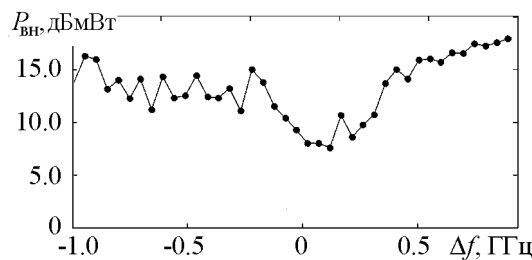


Рис. 5. Зависимость мощности гармонического сигнала $P_{\text{вн}}$, при которой наблюдается полное подавление хаотической динамики спин-волнового генератора, от расстройки по частоте Δf между гармоническим и хаотическим СВЧ-сигналами

СВЧ-сигнала в полосе частот хаотического СВЧ-сигнала, так и при перестройке гармонического СВЧ-сигнала вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала. Представленные на рис. 5 результаты по внешнему виду напоминают так называемый «язык» синхронизации, который наблюдается в автоколебательных системах под внешним воздействием [5–7]. Область синхронизации хаоса находится внутри языка, который в этом случае начинается не со сколь угодно малых (нулевых) значений амплитуды внешнего воздействия, как в случае синхронизации периодических колебаний, а с некоторого порогового значения амплитуды [5,6].

При подаче на вход ЛБВ-усилителя ИМ СВЧ-сигнала с частотой несущего гармонического колебания $f_{\text{вн}} = 3.8$ ГГц, находящегося за пределами полосы частот хаотического СВЧ-сигнала и верхней граничной частоты ПМСВ $f = f_H + f_M/2 = 3416$ МГц (где $f_H = \gamma H_0$, $f_M = 4\pi\gamma M_0$, $\gamma = 2.8$ МГц/Э), но в полосе частот усилителя мощности, во временной области формируется периодическая последовательность хаотических СВЧ-импульсов (рис. 6). При этом мощность в импульсе выби-

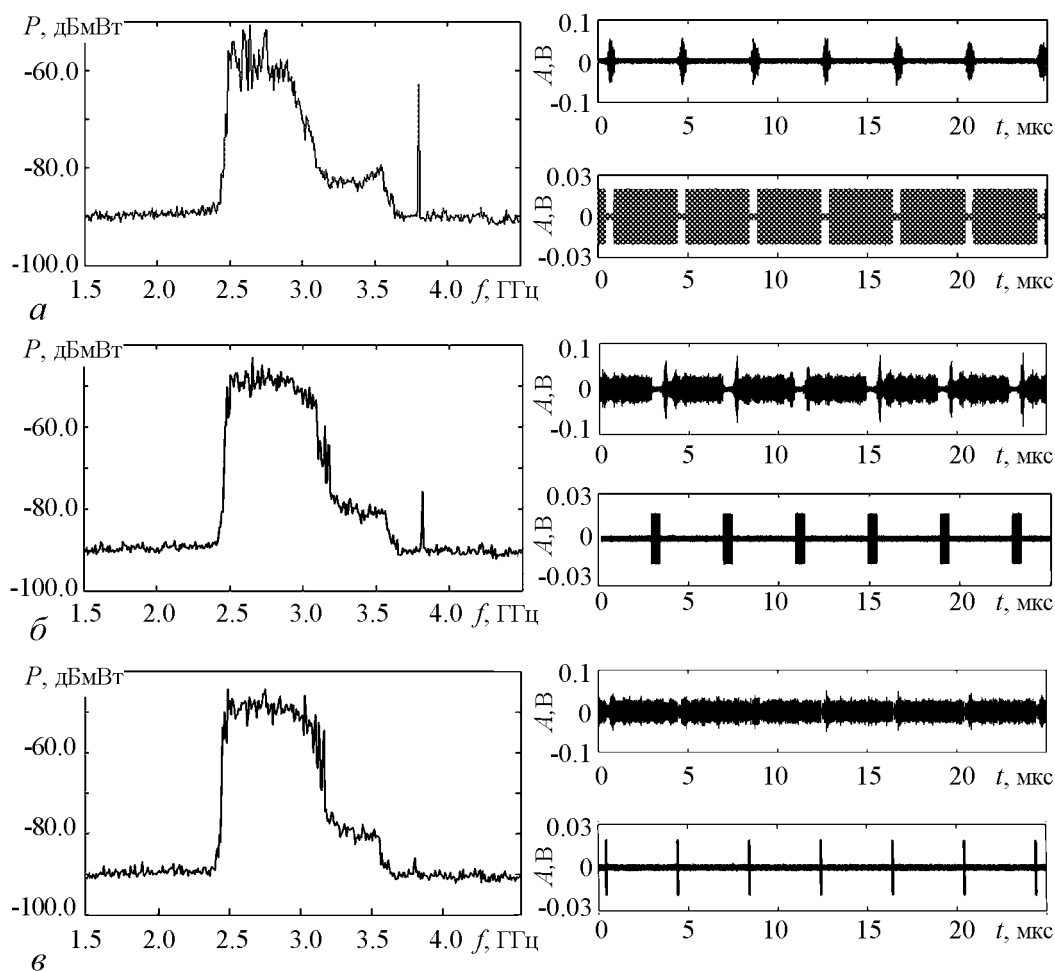


Рис. 6. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка, верхние реализации) хаотического СВЧ-сигнала, полученные со спин-волнового генератора хаоса в присутствии внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала с периодом следования $T_r = 4$ мкс и различной длительностью импульсов $T_d^{\text{ПИ}}$, мкс: 3.5 (а), 0.5 (б), 0.1 (в). Нижние временные реализации – внешние прямоугольные СВЧ-импульсы

рается равной мощности гармонического СВЧ-сигнала, при подаче которого на вход ЛБВ-усилителя наблюдается подавление хаотической динамики системы (см. рис. 4 и 5). Механизм генерации хаотических СВЧ-импульсов заключается в подавлении хаоса (вынужденной синхронизации) на временных интервалах, на которых присутствует внешнее воздействие, и генерации хаоса, когда внешнее воздействие отсутствует. При этом несущая ИМ СВЧ-сигнала оказывается подавленной на 10...30 дБ относительно максимальной по величине спектральной составляющей хаотического СВЧ-сигнала и может быть дополнительно уменьшена при использовании на выходе генератора хаоса режекторного фильтра, настроенного на частоту $f_{\text{вн}}$.

На рис. 6 приведены экспериментальные результаты, полученные при изменении скважности внешних СВЧ-импульсов $q_{\text{РИ}} = T_r^{\text{РИ}}/T_d^{\text{РИ}}$, где $T_r^{\text{РИ}}$ – период следования, а $T_d^{\text{РИ}}$ – длительность внешних радиоимпульсов. Из представленных на рис. 6 результатов следует, что уменьшение $q_{\text{РИ}}$ приводит к увеличению скважности хаотических СВЧ-импульсов $q_{\text{ХИ}}$, и наоборот, увеличение $q_{\text{РИ}}$ приводит к уменьшению $q_{\text{ХИ}}$. При этом скважность хаотических СВЧ-импульсов выражается как

$$q_{\text{ХИ}} = \frac{1}{1 - 1/q_{\text{РИ}}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при $q_{\text{РИ}} \rightarrow \infty$, $q_{\text{ХИ}} \rightarrow 1$ и, наоборот, при $q_{\text{РИ}} \rightarrow 1$, $q_{\text{ХИ}} \rightarrow \infty$.

Как следует из рис. 6, а, при длительности внешних СВЧ-импульсов $T_d^{\text{РИ}} = 3.5$ мкс и периоде следования $T_r^{\text{РИ}} = 4$ мкс в автоколебательной системе генерируются хаотические СВЧ-импульсы с длительностью $T_d^{\text{ХИ}} = T_r^{\text{РИ}} - T_d^{\text{РИ}} = 0.5$ мкс и периодом следования $T_r^{\text{ХИ}} = T_r^{\text{РИ}} = 4$ мкс ($q_{\text{ХИ}} = 8$, $q_{\text{РИ}} = 1.14$). В случае, когда $T_d^{\text{РИ}} = 0.5$ мкс (рис. 6, б), генерируются хаотические СВЧ импульсы с $T_d^{\text{ХИ}} = 3.5$ мкс ($q_{\text{ХИ}} = 1.14$, $q_{\text{РИ}} = 8$), а при $T_d^{\text{РИ}} = 0.1$ мкс (рис. 6, в) – с $T_d^{\text{ХИ}} = 3.9$ мкс ($q_{\text{ХИ}} = 1.03$, $q_{\text{РИ}} = 40$). Таким образом, при $T_r^{\text{РИ}} = T_r^{\text{ХИ}}$ длительность хаотического СВЧ-импульса $T_d^{\text{ХИ}}$ равна паузе между внешними СВЧ-импульсами $T_i^{\text{РИ}} = T_r^{\text{РИ}} - T_d^{\text{РИ}}$, и наоборот, пауза между хаотическими СВЧ-импульсами $T_i^{\text{ХИ}} = T_r^{\text{ХИ}} - T_d^{\text{ХИ}}$ равна длительности внешнего СВЧ-импульса $T_d^{\text{РИ}}$.

Как следует из представленных на рис. 6 результатов, при изменении длительности хаотических СВЧ-импульсов ширина их спектра, измеренная по уровню –50 дБ от максимального значения спектральной мощности, остается практически постоянной и совпадает с шириной спектра непрерывного хаотического СВЧ-сигнала (ср. рис. 3, а и рис. 6 – левые колонки). Как будет показано далее, при $T_d^{\text{ХИ}} < 0.4$ мкс происходит резкое уменьшение интегральной мощности импульсного хаотического СВЧ-сигнала и пиковых значений хаотических СВЧ-импульсов. По-видимому, минимальная длительность хаотических СВЧ-импульсов должна ограничиваться квазипериодом хаотического СВЧ-сигнала [1]. Однако резкое уменьшение пиковых значений хаотических СВЧ-импульсов при $T_d^{\text{ХИ}} < 0.4$ мкс затрудняет их идентификацию при длительностях несколько десятков наносекунд.

Генерация хаотических СВЧ-импульсов наблюдается только в том случае, когда частота внешнего сигнала находится за пределами полосы пропускания полосового фильтра. На рис. 7 приведены результаты измерений, когда несущая ИМ СВЧ-сигнала подается в кольцо на частоте $f_{\text{вн}} = 3.3$ ГГц, находящейся в полосе частот полосового фильтра и на краю полосы частот хаотического СВЧ-сигнала. При этом мощность в импульсе, как и в предыдущем случае, выбирается равной мощности

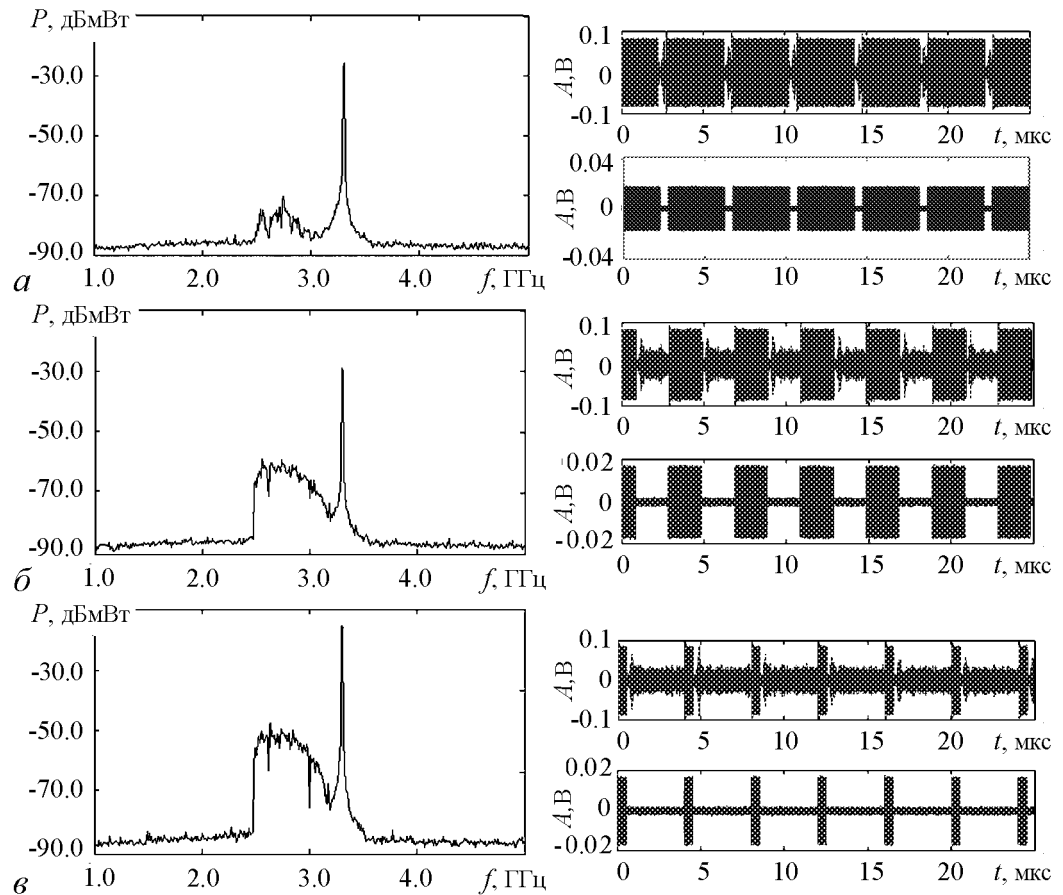


Рис. 7. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка, верхние реализации) хаотического СВЧ-сигнала, полученные со спин-волнового генератора хаоса в присутствии внешнего ИМ СВЧ-сигнала с периодом следования $T_r = 4$ мкс и различной длительностью импульсов T_d , мкс: 3.5 (а), 2 (б), 0.5 (в). Нижние временные реализации – внешние прямоугольные СВЧ-импульсы

гармонического СВЧ-сигнала, при подаче которого на вход ЛБВ-усилителя наблюдается подавление хаотической динамики системы. Из представленных на рис. 7 результатов следует, что на временных интервалах, где присутствует внешнее воздействие, наблюдается подавление хаоса, а на временных интервалах, где внешнее воздействие отсутствует, наблюдается хаотическая генерация. Однако, в отличие от предыдущего случая, между цугами хаотических колебаний наблюдаются цуги гармонических колебаний, амплитуда которых гораздо больше хаотических. Данный факт связан с тем, что при $f_{\text{вн}} = 3.3$ ГГц гармонический СВЧ-сигнал не ослабляется в кольце полосовым фильтром и имеет больший уровень мощности по сравнению с хаотическим сигналом, так как усиливается ЛБВ-усилителем, работающим в режиме максимальной выходной мощности при $P_{\text{вн}} = +15$ дБмВт. Таким образом, во временной области формируется сложный сигнал, состоящий из периодически чередующихся цугов гармонических и хаотических колебаний. Увеличение скважности внешних радиоимпульсов приводит к уменьшению длительности цугов периодических колебаний и к увеличению длительности цугов хаотических колебаний. При этом, в отличие от предыдущего случая, при $T_d^{\text{РИ}} = 3.5$ мкс спектр мощности хаотического СВЧ-сигнала подавляется практически до уровня шумов анализатора спектра.

На рис. 8 приведена зависимость средней за период следования импульсов безразмерной интегральной мощности хаотического СВЧ-сигнала от длительности хаотических СВЧ-импульсов, которая определяется из следующего соотношения:

$$P_n = P_{\text{инт}}^{\text{вн}} / P_{\text{инт}}^{\text{авт}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{инт}}^{\text{вн}}$ – измеренная средняя за период интегральная мощность хаотического СВЧ-сигнала при внешнем воздействии, $P_{\text{инт}}^{\text{авт}}$ – интегральная мощность хаотического СВЧ-сигнала, измеренная в автономном режиме. Для сравнения здесь же приведена расчётная зависимость для неавтономного режима, где P_n определяется как

$$P_n = P_{\text{инт}}^{\text{авт}} / (P_{\text{инт}}^{\text{авт}} q_{\text{ХИ}}) = T_d^{\text{ХИ}} / T_r^{\text{ХИ}} \quad (4)$$

и соответствует средней за период мощности хаотического сигнала, у которого интегральная мощность в импульсе равна $P_{\text{инт}}^{\text{авт}}$. Помимо этого на рис. 8 приведен уровень безразмерной мощности хаотического сигнала в автономном режиме $P_n = 1$, отмеченный штрихпунктирной линией.

Из представленных на рис. 8 результатов видно, что экспериментальная зависимость $P_n(T_d^{\text{ХИ}})$, построенная по соотношению (3) для спин-волнового генератора хаоса, является нелинейной с протяжённой областью значений $T_d^{\text{ХИ}}$, где значения P_n , полученные по соотношению (3), превышают расчётные, полученные по соотношению (4). При малых длительностях хаотических СВЧ-импульсов $T_d^{\text{ХИ}} < 200$ нс экспериментальная зависимость $P_n(T_d^{\text{ХИ}})$ является линейной и практически совпадает с зависимостью, рассчитанной по соотношению (4). При $T_d^{\text{ХИ}} > 200$ нс экспериментальные значения P_n начинают значительно превышать расчётные, и это превышение наблюдается вплоть до максимальных значений $T_d^{\text{ХИ}} = 3.99$ мкс, которые могут быть реализованы в эксперименте. Помимо этого, измеренные в неавтономном режиме значения P_n могут превышать уровень $P_n = 1$, соответствующий автономному режиму генерации. Указанное превышение наблюдается в определенном интервале значений длительности хаотических СВЧ-импульсов $2.2 < T_d^{\text{ХИ}} < 3.99$ мкс и является максимальным при $T_{d,\text{макс}}^{\text{ХИ}} = 3.2$ мкс ($P_n = 1.29$).

Увеличение мощности хаотического сигнала при импульсном воздействии по сравнению с расчётными значениями и с автономным режимом обусловлено тем, что хаотические СВЧ-импульсы имеют на фронте (в нестационарной области) остроконечные пики, в которых мгновенные значения напряжения A превышают мгновенные значения напряжения сигнала в стационарной области (см. рис. 6). Возникновение остроконечных пиков в нестационарной области обусловлено тем, что в моменты времени, соответствующие началу процесса генерации сигнала, нарастание амплитуды огибающей ПМСВ во времени происходит до тех пор, пока она не превысит порог параметрического возбуждения спиновых волн. При превышении данного порога амплитуда огибающей ПМСВ начинает резко падать, что свя-

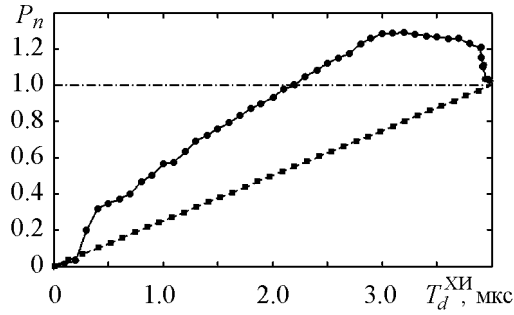


Рис. 8. Зависимости безразмерной интегральной мощности P_n от длительности хаотических СВЧ-импульсов $T_d^{\text{ХИ}}$, построенные с использованием соотношения (3) – кружки (спин-волновой генератор хаоса), квадратики (шумотрон); пунктирная линия – расчётная зависимость по соотношению (4). Данные зависимости построены при $T_r^{\text{ХИ}} = 4$ мкс

зано с перекачкой энергии ПМСВ в энергию параметрически возбуждаемых спиновых волн и ростом их амплитуд [17]³. Как следует из результатов, представленных на рис. 6, уменьшение амплитуды пика (максимального значения амплитуды огибающей ПМСВ) $A_{\text{макс}}$ наблюдается тогда, когда пауза между хаотическими СВЧ-импульсами $T_i^{\text{ХИ}}$ становится меньше времени релаксации спиновых волн $\tau_{\text{рел}}$ ($T_i^{\text{ХИ}} < \tau_{\text{рел}}$ – рис. 6, в). В этом случае, как следует из рис. 8, увеличение P_n наблюдается до $T_d^{\text{ХИ}} = T_{d,\text{макс}}^{\text{ХИ}} = 3.2$ мкс в связи с тем, что при дальнейшем увеличении $T_d^{\text{ХИ}}$ значение $T_i^{\text{ХИ}}$ становится меньше времени релаксации спиновых волн, которое можно определить как $\tau_{\text{рел}} = T_r^{\text{ХИ}} - T_{d,\text{макс}}^{\text{ХИ}} = 0.8$ мкс. Для используемой в эксперименте пленки ЖИГ время релаксации имеет величину $\tau_{\text{рел}} = 1/(\gamma\Delta H) = 0.73$ мкс. Измеренное значение времени релаксации отличается от рассчитанного значения в пределах 10%, что обусловлено непостоянством величины ΔH по всему образцу диска, из которого вырезался пленочный волновод, используемый нами при проведении эксперимента.

Уменьшение максимального значения амплитуды огибающей ПМСВ в стационарной области по сравнению с нестационарной обусловлено тем, что в стационарной области каждый последующий процесс генерации сигнала начинается на временном интервале $\tau_{\text{ПМСВ}} \sim 0.7$ мкс, соответствующем спаданию амплитуды огибающей ПМСВ от максимального до нулевого значений. В этом случае энергия спиновых волн, параметрически возбужденных в предыдущем процессе генерации, не успевает затухнуть при нарастании амплитуды огибающей ПМСВ в результате последующего процесса генерации, что приводит к снижению ее максимального значения. Одними из основных причин возникновения генерации сигнала на временном интервале $\tau_{\text{ПМСВ}}$ являются хаотизация сигнала на частоте кольцевой моды [17], наличие в спектре сигнала частот автомодуляции спиновых волн $f_{\text{ам}}$, время которых $\tau_{\text{ам}} = 1/f_{\text{ам}} < \tau_{\text{ПМСВ}}$, и генерация нескольких кольцевых мод, временной интервал между которыми $\tau_{\text{к}} < \tau_{\text{ПМСВ}}$. В первом случае уменьшение значения $A_{\text{макс}}$ наблюдается вследствие хаотического изменения периода релаксационных колебаний [17]. Во втором случае частоты автомодуляции спиновых волн со значениями $f_{\text{ам}} = 1/\tau_{\text{ПМСВ}} > 1.4$ МГц наблюдаются при больших значениях надкритичности [29–31] и могут присутствовать в спектре широкополосного хаотического СВЧ-сигнала при $G = 10$ дБ. В третьем случае при $G = 10$ дБ генерируется многомодовый хаотический сигнал с $\tau_{\text{к}} \sim 50$ нс, где $\tau_{\text{р}} \ll \tau_{\text{ПМСВ}}$.

Таким образом, в сильно запороговом режиме, при генерации многомодового хаотического СВЧ-сигнала и воздействии на него внешних радиоимпульсов с $T_d^{\text{РИ}} > \tau_{\text{рел}}$, у хаотического СВЧ-импульса в нестационарной области будет всегда формироваться пик, амплитуда которого будет больше максимального значения амплитуды огибающей ПМСВ в стационарной области.

2.2. Генератор хаоса на основе ЛБВ-усилителя. Аналогичный эксперимент по генерации хаотических СВЧ-импульсов был проведен с использованием широкополосного генератора хаоса, собранного по схеме шумотрона [11,12] с полосо-

³Как было показано в [17], данный нелинейный механизм ограничения амплитуды ПМСВ вблизи порога трехволнового параметрического взаимодействия приводит к генерации во временной области периодической последовательности релаксационных колебаний.

пропускающим фильтром в цепи обратной связи. На рис. 9 приведены спектральные, временные и статистические характеристики широкополосного хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого шумотроном в автономном режиме. Из представленных на рис. 9 результатов следует, что, как и в случае спин-волнового генератора хаоса, спектр мощности хаотического СВЧ-сигнала и его временная реализация являются непрерывными. Однако, в отличие от предыдущей схемы, спектр хаотического СВЧ-сигнала содержит два ярко выраженных «горба», перепад ослабления между которыми составляет величину порядка 10 дБ. Распределение плотности вероятностей такого сигнала отличается от нормального закона (см. рис. 9, в) в связи с ограничением амплитуды хаотического сигнала на нелинейном участке зависимости $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ ЛБВ-усилителя.

На рис. 10 приведены результаты, демонстрирующие эффект вынужденной синхронизации хаоса под воздействием внешнего гармонического СВЧ-сигнала, находящегося вне полосы частот хаотического СВЧ-сигнала, но в полосе частот обоих усилителей. Из представленных на рис. 10 результатов следует, что подавление хаотической динамики шумотрона, как и в случае спин-волнового генератора хаоса, наблюдается тогда, когда мощность внешнего гармонического СВЧ-сигнала соответ-

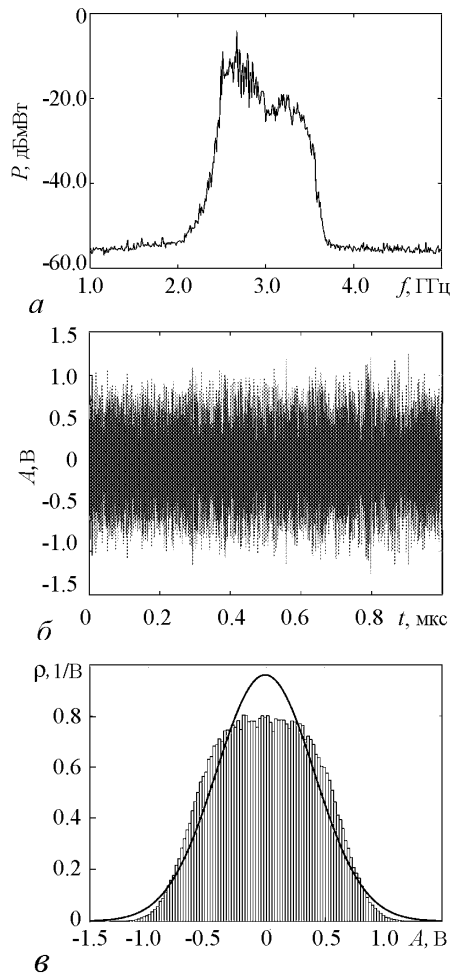


Рис. 9. Спектр мощности (а), временная реализация (б) и распределение плотности вероятностей хаотического СВЧ-сигнала (в), генерируемого шумотроном в автономном режиме. Сплошной линией на (в) показан гауссов закон распределения, рассчитанный с использованием выражения (1) при $m = -0.0064$ и $\sigma = 0.416$

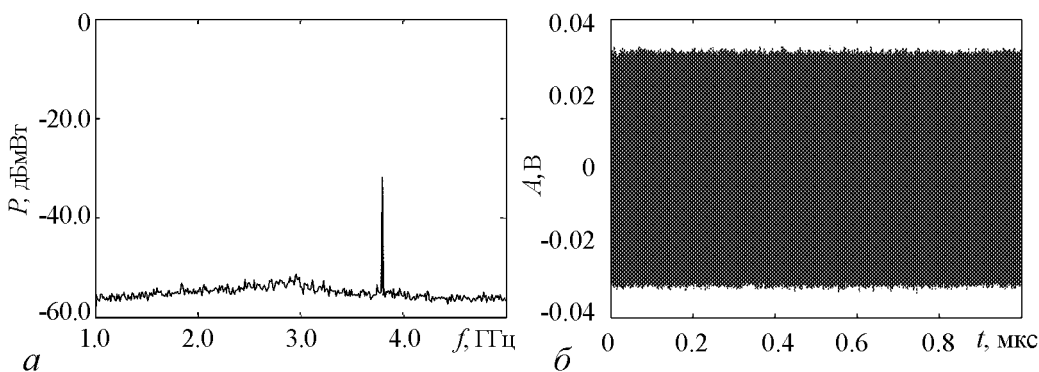


Рис. 10. Спектр мощности (а) и временная реализация (б) сигнала, генерируемого шумотроном в неавтономном режиме под воздействием внешнего гармонического СВЧ-сигнала с частотой $f_{\text{вн}} = 3.8$ ГГц и мощностью $P_{\text{вн}} = +10$ дБмВт

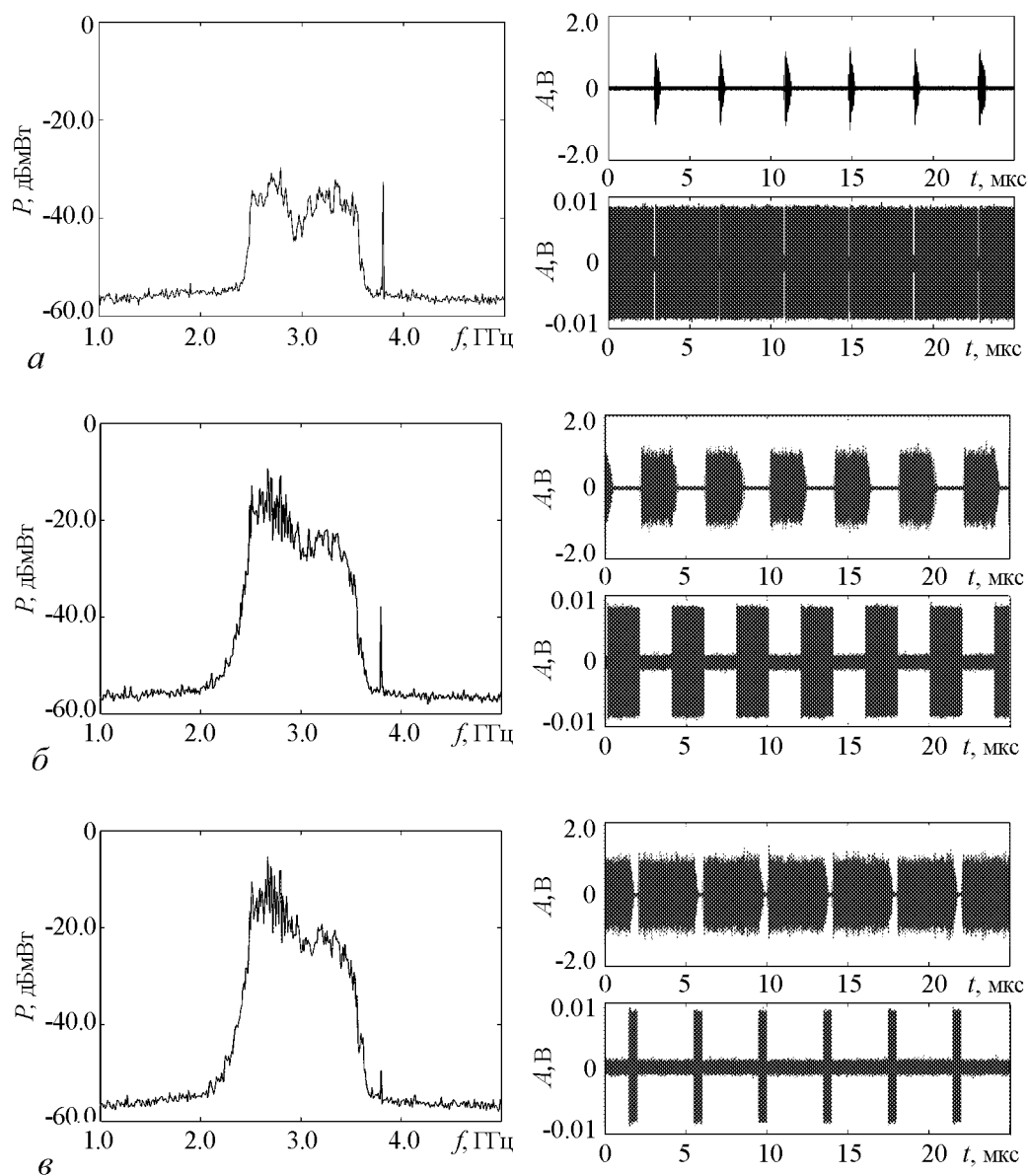


Рис. 11. Спектры мощности (левая колонка) и временные реализации (правая колонка, верхние реализации) хаотического СВЧ-сигнала, полученные с шумотрона в присутствии внешнего импульсно-модулированного СВЧ-сигнала с периодом следования $T_r = 4$ мкс и различной длительностью импульсов T_d^{PI} , мкс: 3.9 (а), 2.0 (б), 0.5 (в). Нижние временные реализации – внешние прямоугольные СВЧ-импульсы

ствует режиму насыщения усилителя мощности. Однако, в случае шумотрона в полосе частот хаотического сигнала наблюдается шумоподобный максимум, который, на наш взгляд, соответствует собственным тепловым шумам ЛВВ-усилителя, усиленным твердотельным усилителем.

На рис. 11 представлены результаты, демонстрирующие формирование хаотических СВЧ-импульсов при подаче на вход транзисторного усилителя мощности ИМ СВЧ-сигнала с частотой несущей, соответствующей частоте $f_{вн} = 3.8$ ГГц и

находящейся за пределами полосы частот хаотического СВЧ-сигнала. Из представленных на рис. 11 результатов следует, что, как и в случае спин-волнового генератора хаоса, хаотические СВЧ-импульсы формируются на временных интервалах, соответствующих паузам между внешними радиоимпульсами. При этом зависимость $q_{\text{ХИ}}(q_{\text{РИ}})$ аналогична (2). Однако, в отличие от хаотических СВЧ-импульсов, формируемых спин-волновым генератором хаоса, хаотические СВЧ-импульсы, генерируемые шумотроном, не содержат в нестационарной области пиков, амплитуда которых больше, чем амплитуда сигнала в стационарной области. Данный факт приводит к тому, что интегральная мощность такого импульсного хаотического СВЧ-сигнала, определяемая по соотношению (3), практически соответствует ее расчетному значению, определяемому по соотношению (4). В этом случае, как следует из результатов, представленных на рис. 8, зависимость $P_n(T_d^{\text{ХИ}})$ является линейной при всех значениях $T_d^{\text{ХИ}}$.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния внешнего периодического воздействия на хаотическую динамику двух различных широкополосных кольцевых генераторов на основе ЛБВ-усилителя, в одном из которых в цепь обратной связи включена спин-волновая линия передачи, а в другом – транзисторный усилитель мощности. Показано, что в первом случае, когда хаотическая динамика системы определяется трехволновыми параметрическими взаимодействиями спиновых волн в ферромагнитной пленке, подача в кольцо импульсно-модулированного СВЧ-сигнала с частотой несущей, находящей вне полосы хаотического сигнала, приводит к генерации хаотических СВЧ-импульсов с ярко выраженным пиком, формирующимся на фронте каждого импульса в нестационарной области. Амплитуда этого пика гораздо больше амплитуды хаотического сигнала в стационарной области, что приводит к увеличению интегральной мощности импульсного хаотического СВЧ-сигнала по сравнению как с ее расчетными значениями, так и с мощностью непрерывного хаотического СВЧ-сигнала. Указанный эффект увеличения мощности хаотического СВЧ-сигнала в импульсном режиме наблюдается только у спин-волнового генератора хаоса и отсутствует в другом широкополосном генераторе хаоса (шумотроне), в котором генерация хаотического СВЧ-сигнала обусловлена нелинейностью ЛБВ-усилителя.

Полученные в ходе выполнения работы результаты представляют интерес для выяснения особенностей неавтономной хаотической динамики широкополосных кольцевых автоколебательных систем на основе ферромагнитных пленок и могут быть использованы при разработке источников хаотических радиоимпульсов для систем связи [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00047), в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект № НШ-1430.2012.2) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект № 14.740.11.1078)

Библиографический список

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверх-

- высоких частот / Под ред. А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова Т. 2: Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
3. *Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Юркин В.Ю.* Сверхширокополосные беспроводные сенсорные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 4. С. 90.
 4. *Атанов Н.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А.* Формирование хаотических радиоимпульсов в генераторе с внешним периодическим воздействием // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 15. С. 1.
 5. *Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
 6. *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Стрелкова Г.И.* Синхронизация регулярных, хаотических и стохастических колебаний. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.
 7. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М.* Синхронизация хаотических колебаний путем подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 3. С. 52.
 8. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н.* Способ генерации хаотических радиоимпульсов большой мощности для прямохаотических систем связи. Патент на изобретение, РФ. № 2349027. 2009. Бюллетень № 7.
 9. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Скороходов В.Н.* Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73, вып. 7. С. 105.
 10. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Бирюков А.А.* Генерация хаотических радиоимпульсов с помощью клистронного автогенератора с запаздыванием // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 4. С. 36.
 11. *Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В.* Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. АС № 1125735. 1984. Бюллетень № 43.
 12. *Анисимова Ю.В., Воронцов Г.М., Залогин Н.Н., Кислов В.Я., Мясин Е.А.* Шумотрон // Радиотехника. 2000, № 2. С. 19.
Кузнецов С.П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью. Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. XXV, № 12. С. 1410.
 13. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
 14. *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* Некоторые особенности перехода к хаосу при автомодуляции поверхностных спиновых волн // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66, вып. 4. С. 243.
 15. *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* Стохастическая генерация при параметрическом возбуждении спиновых волн в пленках железиттриевого граната // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, вып. 7. С. 66.
 16. *Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г.* Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 8. С. 100.
 17. *Wu M., Kalinikos V.A., and Patton C.E.* Self-generation of chaotic solitary spin wave pulses in magnetic film active feedback rings // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 237202.
 18. *Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П.* Генерация широ-

- кополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитоэлектрических волнах // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 5. С. 89.
19. *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калинин Б.А., Benner H.* Автогенерация хаотического сигнала в активных кольцах на основе ферромагнитных пленок // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 11. С. 81.
 20. *Hagerstrom A.M., Tong W., Wu M., Kalinikos B.A., and Eykholt R.* Excitation of chaotic spin waves in magnetic film feedback rings through three-wave nonlinear interaction // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102, 207202.
 21. *Wu M., Hagerstrom A.M., Eykholt R., Kondrashov A., and Kalinikos B.A.* Excitation of chaotic spin waves through modulation instability // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. 237203.
 22. *Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калинин Б.А.* Управляемая генерация хаотического СВЧ-сигнала в условиях четырехволнового параметрического взаимодействия поверхностных спиновых волн // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 5. С. 62.
 23. *Бегинин Е.Н., Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* Влияние амплитудной и фазовой нелинейности спин-волновой линии задержки на генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала // ПЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 7. С. 65.
 24. *Гришин С.В., Зарькова Е.В., Шараевский Ю.П.* Генерация хаотических СВЧ-импульсов в широкополосной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной пленкой под воздействием импульсно-модулированного СВЧ-сигнала // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 5. С. 96.
 25. *Hagerstrom A., Wu M., Eykholt R., and Kalinikos B.A.* Tuning of chaotic surface spin waves in a magnetic-film feedback ring via the ring gain // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83, 104402.
 26. *Grishin S.V., Sharaevskii Yu.P., Nikitov S.A., Beginin E.N., Sheshukova S.E.* Self-generation of chaotic dissipative soliton trains in active ring resonator with 1-D magnonic crystal// IEEE Trans. on Magnetics. 2011. Vol. 47, No. 10. P. 3716.
 27. *Дудко Г.М., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А.* Стохастизация сигнала магнитоэлектрических волн в ферритовых пленках// Тезисы докладов XV Всесоюзного семинара Гироманитная электроника и электродинамика, 1987, Куйбышев. С. 21.
 28. *Кожевников А.В.* Автореф. дис. ... канд. физ-матем. наук. Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Саратов, 2011. 18 с.
 29. *Медников А.М.* Нелинейные эффекты при распространении поверхностных спиновых волн в пленках ЖИГ // ФТТ. 1981. Т. 23, вып. 1. С. 242.
 30. *Козаков Г.Т., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А.* Влияние параметрически возбужденных спиновых волн на дисперсию и затухание поверхностных магнитоэлектрических волн в ферритовых пленках // ЖЭТФ. 1999. Т. 115, вып. 1. С. 318.
 31. *Гришин С.В., Шараевский Ю.П.* Излучение шумоподобных спин-волновых пакетов при трехмагнонных процессах распада и кинетической неустойчивости волн в ферромагнитной пленке // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89, вып. 2. С. 59.

Саратовский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступила в редакцию
После доработки

15.06.2009
4.09.2009

CHAOTIC MICROWAVE PULSE GENERATION IN WIDEBAND SPIN-WAVE AND VACUUM OSCILLATORS OF CHAOS UNDER EXTERNAL PERIODICAL INFLUENCE

*S. V. Grishin, B. S. Dmitriev, Yu. D. Zharkov,
R. A. Manyshev, V. N. Skorokhodov*

The non-autonomous generation of chaotic microwave pulses in the wideband chaos oscillators is experimentally investigated. Nonlinearity of a spin-wave transmission line is a cause of chaotic dynamics of the spin-wave chaos oscillator and nonlinearity of a TWT amplifier is a cause of chaotic dynamics of the other chaos oscillator. It is shown, that in both cases, the generation of chaotic microwave pulses is observed when an external pulse-modulated microwave signal has a certain power level and its carrier is detuned from a central frequency of a chaotic signal. However, in non-autonomous regime, the increase of integral power of a chaotic microwave signal in comparison with the autonomous regime is only observed in the spin-wave chaos oscillator. This effect is demonstrated by the change of pulse ratio of external microwave pulses. The three-wave parametric interaction of spin waves in a ferromagnetic film leading to the increase of amplitude of a chaotic signal in a non-stationary range in comparison with the stationary range is a cause of the increase of integral power of a chaotic pulse signal.

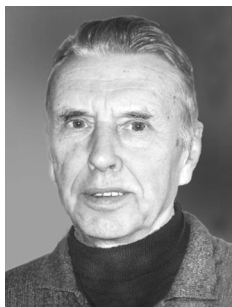
Keywords: Chaos oscillator, TWT amplifier, ferromagnetic film, magnetostatic wave, parametric instability.

Гришин Сергей Валерьевич – родился в 1974 году. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (1997). В настоящее время является доцентом кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ и старшим научным сотрудником лаборатории «Метаматериалы» научно-исследовательского института механики и физики СГУ. Принимает участие в выполнении грантов РФФИ, ФЦП, президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ, гранта правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования. Автор 25 научных статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах, и 5 патентов на изобретение. Является соавтором коллективной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот». Область научных интересов – нелинейные волны и хаос в магнитных пленках, нелинейные устройства на спиновых волнах, метаматериалы на основе магнитных пленок.

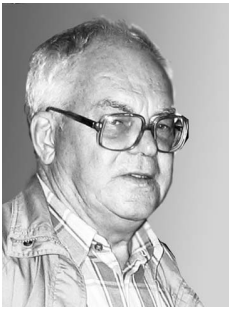


410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: grishfam@sgu.ru

Дмитриев Борис Савельевич – родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского университета (1959). В настоящее время – профессор кафедры нелинейной физики СГУ, доктор физ.-мат. наук. Читает лекции по общему курсу физики, радиофизике и электронике, концепциям современного естествознания. Область научных интересов – микроволновая электроника и радиофизика, нелинейная динамика распределённых систем. Опубликовал более 150 научных работ и учебных пособий, монографию «Относительность – время, пространство, поля» (с грифом учебного пособия для вузов), автор 16 изобретений и патентов.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: DmitrievBS@info.sgu.ru



Жарков Юрий Дмитриевич – родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время – профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями, исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал более 200 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского



Маньшин Роман Александрович – родился в 1987 году. Окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского (2012). В настоящее время обучается на первом курсе магистратуры по специальности «Радиофизика». Принимал участие в европейском проекте IRSES под названием «PAS», в рамках которого проходил стажировку в международной ассоциированной лаборатории LIA «LEMAS». В настоящее время является исполнителем гранта РФФИ. Область научных интересов – нелинейные волны и хаос в магнитных пленках, нелинейные устройства на спиновых волнах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: thezaurus@mail.ru



Скорородов Валентин Николаевич – родился в 1959 году. Окончил физический факультет СГУ в 1982 году. В настоящее время является заведующим лабораторией кафедры электроники, колебаний и волн. Область научных интересов: нелинейная динамика в СВЧ-электронике. Автор более 15 статей в отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского