

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра нелинейной физики

Управление генерацией хаотического СВЧ сигнала в спин-волновом
автогенераторе с помощью периодического и шумового внешнего
воздействия

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4011 группы

Направления 03.03.01 Прикладные математика и физика

Института Физики

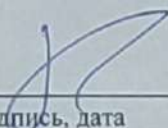
Гурченко Дмитрий Алексеевич

Научный руководитель
старший преподаватель кафедры
нелинейной физики



Д. В. Романенко

Зав. кафедрой
нелинейной физики
к.ф.-м.н., доцент



Е.Н. Бегинин

Саратов 2026 г.

Содержание

Введение.....	3
1. Измерение АЧХ и ФЧХ линии задержки на магнитостатических волнах радиofизическими методами.....	4
2. Экспериментальное исследование по автономной генерации СВЧ сигнала в кольцевом автогенераторе с линией задержки на магнитостатических волнах	6
3. Исследование режимов генерации СВЧ сигнала при монохроматическом воздействии	7
4. Исследование режимов генерации СВЧ сигнала при импульсном воздействии	9
5. Исследование поведения кольцевой автоколебательной системы при воздействии шумового сигнала.	9
Заключение	11
Список использованной литературы.....	12

Введение

Генерация хаотического сигнала в сверхвысокочастотном диапазоне представляет собой эффект самовозбуждения нелинейной автоколебательной системы с положительной обратной связью. При превышении порога генерации в такой системе устанавливается аperiodический режим, формально описываемый системой обыкновенных дифференциальных уравнений, но демонстрирующий практически непредсказуемую долговременную динамику и широкий непрерывный спектр мощности [1]. Ключевой особенностью является экспоненциальная расходимость близких траекторий в фазовом пространстве - так называемая чувствительность к начальным условиям, которая и отличает детерминированный хаос от регулярных колебаний.

Практический интерес к хаотическим СВЧ генераторам обусловлен рядом уникальных свойств. Во-первых, широкополосный спектр с близкой к равномерной плотностью мощности открывает возможности для систем связи с расширенным спектром, где информация встраивается непосредственно в структуру несущего сигнала. Была предложена схема прямой хаотической связи, в которой скорость передачи данных сопоставима с шириной спектра хаотического сигнала [2]. Во-вторых, сложная непредсказуемая структура хаоса на масштабах порядка корреляционного времени обеспечивает низкую вероятность обнаружения и перехвата, что востребовано в радиолокации и радиопротиводействии. В-третьих, хаотические генераторы с высокой энтропией используются как источники физической случайности в криптографических системах [1].

Среди различных физических реализаций хаотических СВЧ генераторов активные кольцевые резонаторы с линией задержки на магнитоэлектрических волнах (МЭВ) в ферромагнитных плёнках железо-иттриево граната (ЖИГ) выделяются уникальным сочетанием свойств: компактностью, низким порогом генерации, широким диапазоном

перестройки частоты внешним магнитным полем и богатой нелинейной динамикой. В таких системах экспериментально реализованы самогенерация солитонных последовательностей [3,4], фрактальные режимы [5], рекуррентия Ферми–Паста–Улама [6], а также хаотическая генерация со спектральной шириной до 1000 МГц [1,2].

Исторически первые эксперименты по самогенерации в ЖИГ-кольцах использовали СВЧ-ключ для периодического прерывания обратной связи.

Актуальность работы заключается в экспериментальном исследовании возможностей управления генерацией сигнала в широкополосном хаотическом автогенераторе, которые могут быть использованы для создания устройств прямохаотической передачи информации.

Цель работы - экспериментальное исследование управления хаотической генерацией СВЧ сигнала в кольцевом автогенераторе с линией задержки на магнитостатических волнах с помощью аддитивного внешнего воздействия в виде монохроматического, импульсного и шумового сигналов.

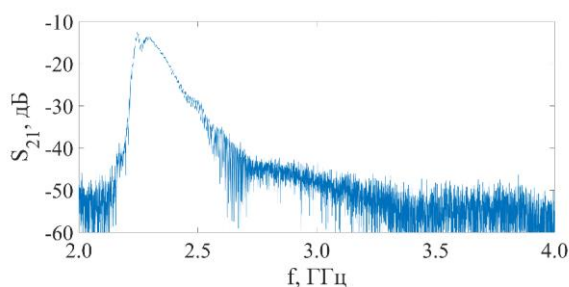
1. Измерение АЧХ и ФЧХ линии задержки на магнитостатических волнах радиофизическими методами

Исследуемая линия задержки изготовлена на основе ферромагнитной плёнки железо - иттриево граната (ЖИГ) на подложке гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Параметры плёнки: толщина $d = 10$ мкм, ширина $w = 4$ мм, длина $l = 20$ мм. Намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 1300$ Гс, гироманнитное отношение $|\gamma|/2\pi = 2,8$ МГц/Э.

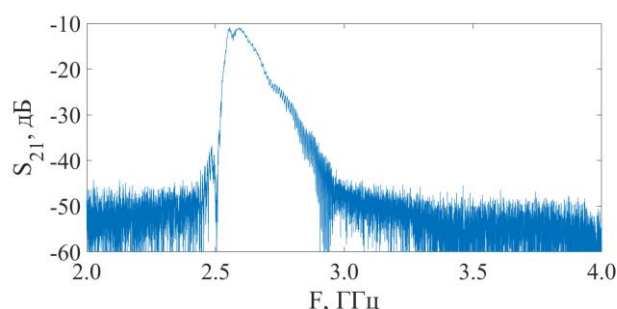
Возбуждение и приём МСВ осуществляются микрополосковыми антеннами, расположенными на поверхности плёнки. Ширина антенн $a = 30$ мкм, длина 5 мм, расстояние между антеннами $L=10$ мм определяет длину линии задержки. Измерения проводились в линейном режиме при отключённой обратной связи. На входную антенну подавался зондирующий

СВЧ сигнал малой мощности ($P_{in} = -30$ дБм), не вызывающий заметных нелинейных эффектов. Сигнал с выходной антенны регистрировался векторным анализатором цепей, обеспечивающим одновременное измерение амплитуды и фазы передаточной функции.

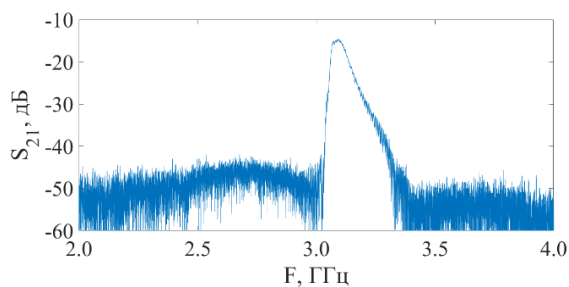
Векторный анализатор цепей измеряет комплексный коэффициент передачи $S_{21}(f) = |S_{21}(f)|e^{i\varphi(f)}$, где $|S_{21}(f)|$ определяет АЧХ, а $\varphi(f)$ - ФЧХ линии задержки. Амплитудно-частотная характеристика выражается в децибелах: $A(f) = 20\lg|S_{21}(f)|$. Измерения проводились при различных значениях внешнего поля H_0 в диапазоне 355 – 770 Э, что соответствует рабочим частотам 2 – 4 ГГц. Для каждого значения поля снимались АЧХ и ФЧХ в полосе пропускания соответствующего типа МСВ. Экспериментально установлено, что в автогенераторе нелинейные эффекты существенно проявляются при частотах ниже 4 ГГц; при более высоких частотах параметрический распад практически не влияет на динамику генерации. Таким образом, рабочий диапазон для исследований автономной и управляемой генерации выбран в области частот 2.5– 3.5 ГГц при внешних полях 355–770 Э, где обеспечивается оптимальное сочетание нелинейности, низких потерь и устойчивости параметрических процессов.



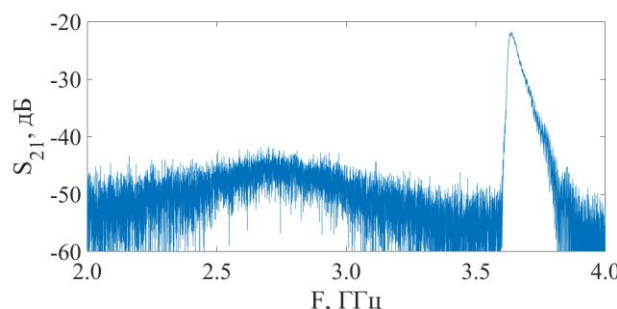
(а)



(б)



(в)

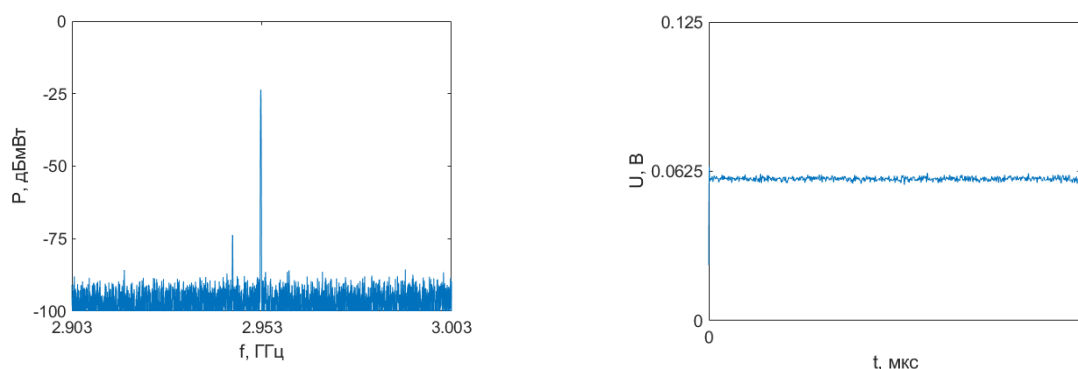


(г)

Рис. 1 Экспериментально измеренные АЧХ ПМСВ в пленке ЖИГ, и значения внешнего магнитного поля H_0 : а) 355 Э, б) 440 Э, в) 590Э, г) 770 Э.

2. Экспериментальное исследование автономной генерации СВЧ сигнала в кольцевом автогенераторе с линией задержки на магнитоэлектрических волнах

Кольцо состоит из линии задержки на МСВ (ЖИГ-плёнка толщиной 10 мкм, шириной 4 мм, длиной 20 мм, расстояние между антеннами порядка 10 мм), широкополосного СВЧ-усилителя с линейным коэффициентом усиления 52 дБ и линейной характеристикой в полосе 2 – 8 ГГц, а также регулируемого аттенюатора для управления коэффициентом усиления. Сигнал с выхода линии задержки через направленный ответвитель поступает на осциллограф (временные измерения) и анализатор спектра (спектральные измерения). Внешнее статическое магнитное поле $H_0 = 560$ Э приложено в плоскости плёнки перпендикулярно направлению распространения волн, что обеспечивает генерацию поверхностных МСВ. Данная конфигурация выбрана таким образом, чтобы учесть трёхволновые процессы: половинная частота основной волны лежит в границах спектра возбуждения параметрически возбуждаемых волн. Критическим параметром, определяющим динамику кольцевой системы, является коэффициент усиления G , представляющий собой разность между усилением усилителя и суммарными потерями в кольце, включая потери в линии задержки, в аттенюаторе и на вставках. При последовательном увеличении G наблюдалась последовательная смена динамических режимов, представленная на рис.2.



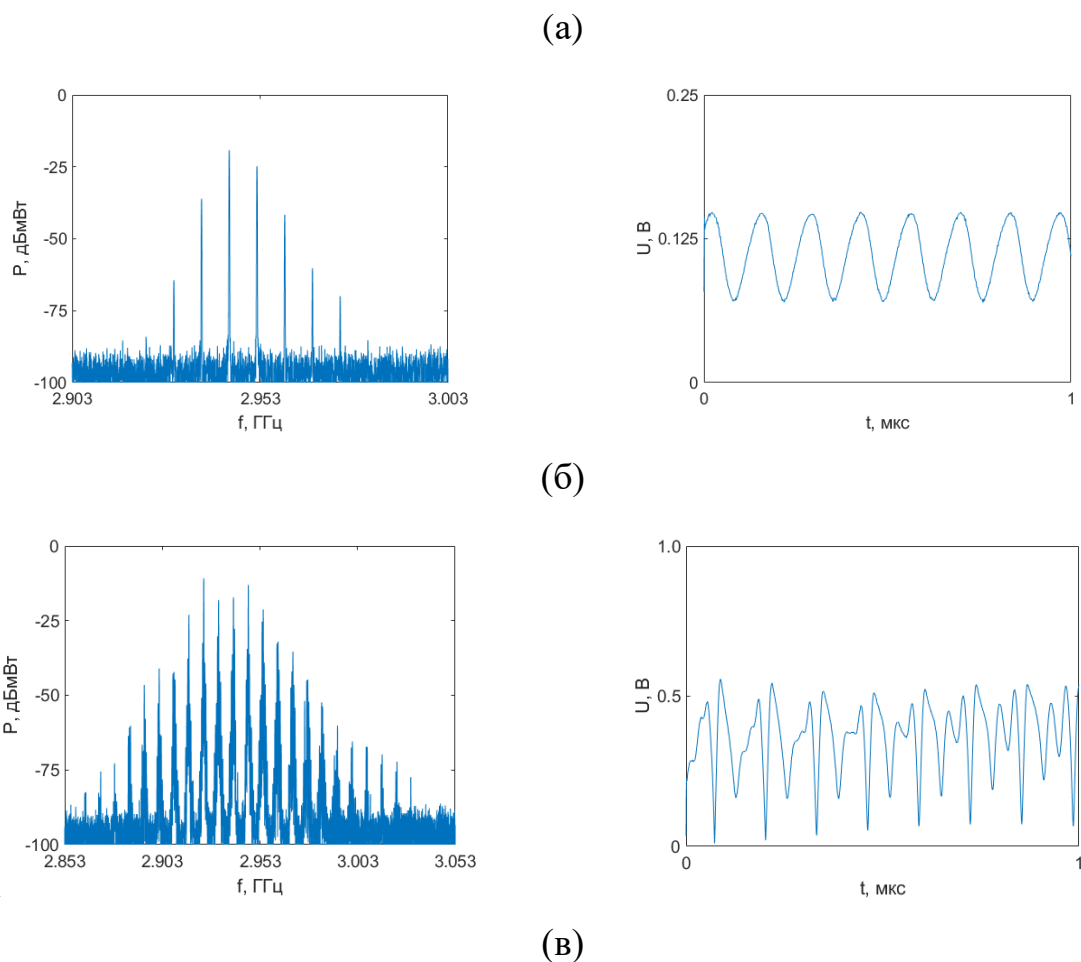


Рис. 2. Спектр мощности (слева) и временная реализация (справа) сигнала в кольцевом автогенераторе при $G =$ а) 0 дБ, б) 1.1 дБ, в) 6.8 дБ

3. Исследование режимов генерации СВЧ сигнала при монохроматическом внешнем воздействии

При подаче внешнего монохроматического сигнала на работающий в монохроматическом режиме автогенератор наблюдалось подавление собственной динамики и установление регулярного колебания на частоте внешнего воздействия. Для количественной характеристики эффективности подавления сигнала построена зависимость пороговой мощности $P_{\text{порог}}$ от частоты отстройки Δf (рис.3)

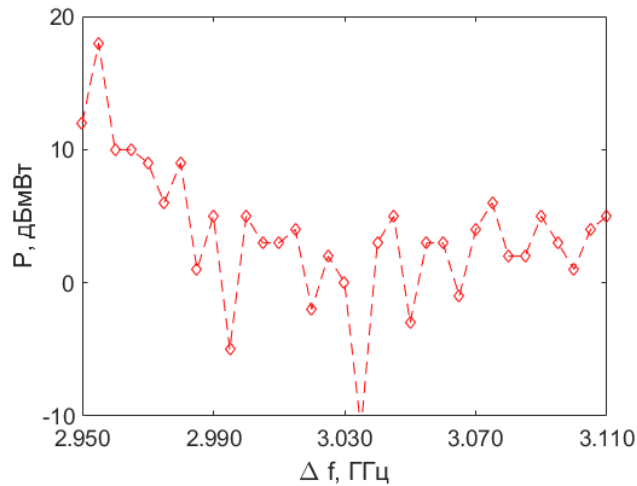


Рис.3 График зависимости пороговой мощности подавления генерации от частоты отстройки $P_{\text{порог}}(\Delta f)$.

Асимметрия зависимости проявляется в различном поведении при положительной и отрицательной отстройке: порог при $\Delta f > 0$ (внешняя частота выше несущей) несколько ниже, чем при симметричной отрицательной отстройке. Данное поведение может быть связано с асимметрией спектра хаотического сигнала и нелинейной дисперсией линии задержки.

При подаче внешнего монохроматического сигнала на работающий в хаотическом режиме автогенератор наблюдалось качественное изменение динамики системы. Монохроматическое воздействие на хаотическую генерацию позволяет наблюдать несколько характерных режимов работы, спектры которых представлены на рис. 4.

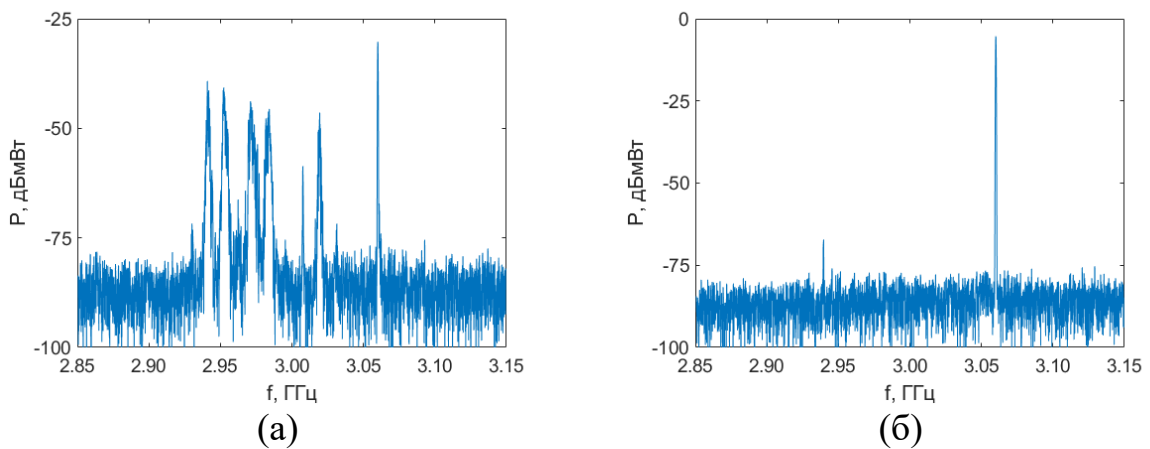


Рис. 4 Спектры мощности неавтономной системы при монохроматическом внешнем воздействии на частоте 3.06 ГГц при различных величинах мощности сигнала (а) = -20 дБмВт, (б) = 12 дБмВт

4. Исследование режимов генерации СВЧ сигнала при импульсном внешнем воздействии

Для рассмотрения импульсного воздействия был выбран базовый режим, при котором в автономном случае находилась в режиме генерации хаотического сигнала с шириной полосы ~ 150 МГц и несколькими кольцевыми модами. Амплитуда и центральная частота импульсного сигнала выбиралась таким образом, чтобы соответствовать режиму синхронизации как в случае при монохроматическим воздействием. При таком выборе при наличии внешнего сигнала, кольцевая система должна входить в режим синхронизации с генератором в те временные отрезки, на которых сигнал присутствует, а в моменты отсутствия внешнего сигнала будет наблюдаться переходной режим генерации. Период следования импульсов в последовательности был выбран равным $T_p=16$ мкс, а длительность внешних T_{out} импульсов менялась от 2 до 14 мкс. При достижении $T=2.7$ мкс генерируемая между внешними импульсами последовательность хаотических СВЧ импульсов сокращается до одного импульса, причем его форма практически не меняется во времени (см рис.4).

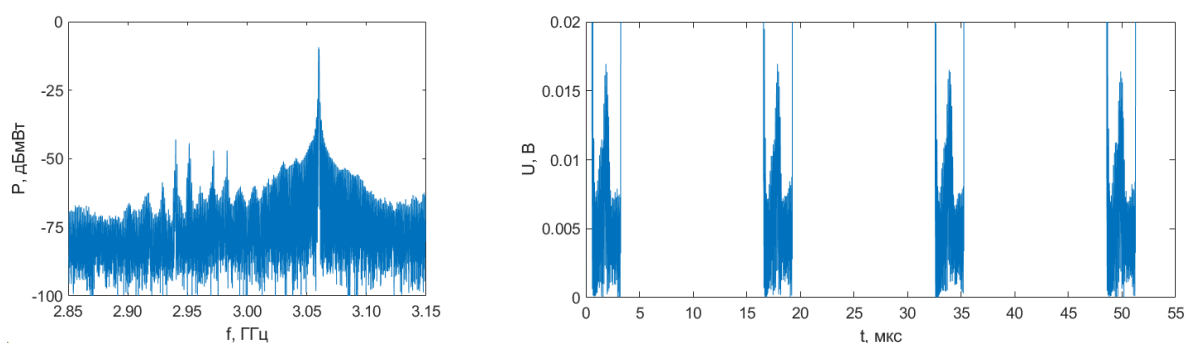


Рис. 5 спектр мощности (слева) и временная реализация (справа) при импульсном воздействии $T = 2.7$

5. Исследование поведения кольцевой автоколебательной системы при воздействии шумового сигнала

Когерентный резонанс - это фундаментальное нелинейное явление, которое впервые было открыто в возбудимых шумом системах [7]. Оно заключается в том, что у шумового воздействия есть некий оптимальный

уровень, при котором индуцированные шумом колебания становятся наиболее близкими к регулярным. В этом случае зависимость времени автокорреляции от интенсивности шума имеет ярко выраженный максимум при определенной интенсивности шума [8]. При воздействии белого шума с полосой частот 5 МГц и центральной частотой 3.06 ГГц на кольцевую систему находящуюся в режиме хаотической генерации время автокорреляции сначала резко уменьшается при увеличении P до -22 дБмВт, затем следует плавный рост, но при этом максимальное значение времени автокорреляции наблюдается при слабом внешнем воздействии. Аналогичный сценарий наблюдается при воздействии белого шума с полосой 15 МГц

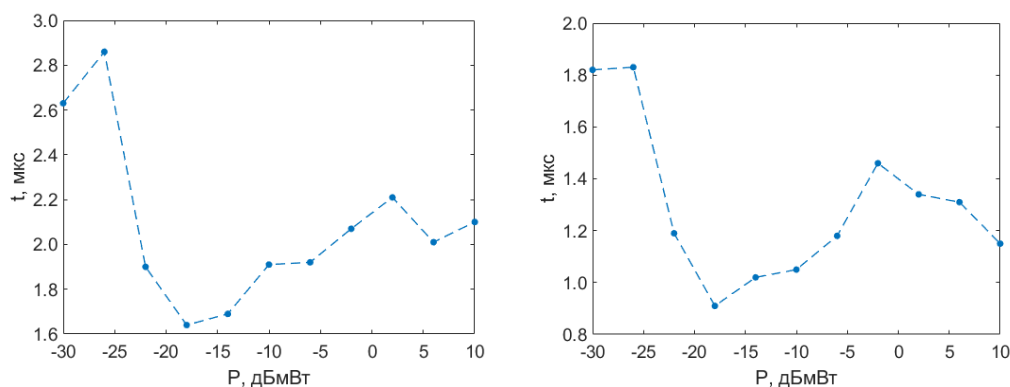


Рис. 6 Зависимость времени автокорреляции от интенсивности шумового воздействия при $\Delta f=5$ МГц (слева) и $\Delta f=15$ МГц (справа)

Заключение

В ходе выполнения работы была собрана экспериментальная установка по генерации широкополосного хаотического сигнала на основе линии передачи на магнитостатических волнах. Экспериментально продемонстрирована генерация широкополосного многомодового хаоса при больших значениях коэффициента усиления кольцевого автогенератора. В случае квазимонохроматической генерации показано, что в спин-волновом автогенераторе может наблюдаться явление вынужденной синхронизации при аддитивном внешнем монохроматическом воздействии. Показано, что в случае импульсного воздействия с амплитудой внешнего импульса выше порога вынужденной синхронизации в переходной области возможно формирование самоподобных последовательностей хаотических широкополосных импульсов при определенной длительности и периоде внешнего воздействия. Показано, что при аддитивном воздействии на широкополосную хаотическую автогенераторную схему на основе спиновых волн внешнего шумового сигнала, явление когерентного резонанса не наблюдается.

Список литературы

1. Wu, M. Excitation of chaotic spin waves through modulational instability / M. Wu, A. M. Hagerstrom, R. Eykholt, A. Kondrashov, B. A. Kalinikos // *Physical Review Letters*. — 2009. — Vol. 102, № 23. — P. 237203.
2. Patton, C. E. Nonlinear ferrite film microwave signal processing for advanced communications—physics and devices / C. E. Patton, M. Wu, K. R. Smith, V. I. Vasyuchka // *Ferroelectrics*. — 2006. — Vol. 342. — P. 101–106.
3. Kalinikos, B. A. Self-generation of microwave magnetic envelope soliton trains in yttrium iron garnet thin films / B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, C. E. Patton // *Physical Review Letters*. — 1998. — Vol. 80, № 19. — P. 4301–4304.
4. Kalinikos, B. A. Decay free microwave magnetic envelope soliton pulse trains in yttrium iron garnet thin films / B. A. Kalinikos, N. G. Kovshikov, C. E. Patton // *Physical Review Letters*. — 1997. — Vol. 78, № 14. — P. 2827–2830.
5. Wu, M. Observation of spin-wave soliton fractals in magnetic film active feedback rings / M. Wu, B. A. Kalinikos, L. D. Carr, C. E. Patton // *Physical Review Letters*. — 2006. — Vol. 96, № 18. — P. 187202.
6. Wu, M. Experimental observation of Fermi-Pasta-Ulam recurrence in a nonlinear feedback ring system / M. Wu, C. E. Patton // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 98, № 4. — P. 047202.
7. Hu G., Ditzinger T., Ning C.Z., Haken H. Stochastic resonance without external periodic force // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, No 6. P. 807–810.
8. Pikovsky A., Kurths J. Coherence resonance in a noise driven excitable system // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 78, No 5. P. 775–778.