

## УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЕЙ ХАОТИЧЕСКОГО СВЧ-СИГНАЛА В НЕАВТОНОМНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СИСТЕМЕ НА ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЁНКЕ

*Д. В. Романенко*

Приведены экспериментальные результаты по генерации хаотического СВЧ-сигнала в неавтономной активной кольцевой системе на основе ферромагнитной плёнки в условиях существования трехволновых процессов распада. Показана возможность управления динамикой системы внешним гармоническим воздействием. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования.

*Ключевые слова:* Ферромагнитная структура, автоколебательная система, хаос, трехволновые процессы.

### Введение

В настоящее время внимание исследователей привлекают кольцевые динамические системы, используемые для генерации хаотического СВЧ-сигнала [1]. Подобные системы обладают рядом преимуществ при использовании их в качестве передатчиков информации: высокий уровень скрытности при передаче информации, широкополосность и хорошая управляемость, обусловленная большой чувствительностью таких систем к изменению управляющих параметров [2]. Одним из важных направлений, связанных с генерацией хаотического СВЧ-сигнала в кольцевых схемах, является использование в них нелинейных элементов на основе монокристаллических ферромагнитных плёнок (см., например, [3–6]). Следует отметить, что в отличие от более традиционных вакуумных и транзисторных генераторов нелинейная динамика системы на ферромагнитных плёнках, в первую очередь, определяется параметрами самой плёнки, в то время как усилитель мощности используется только для компенсации потерь [4–5], причём нелинейные эффекты в ферромагнитных плёнках проявляются уже при достаточно низких уровнях мощности.

Одним из возможных механизмов, приводящих к хаотизации сигнала в кольцевой системе с ферромагнитной плёнкой является параметрическое возбуждение

коротковолновых спиновых волн (СВ) [4–10]. Данный эффект наблюдался в диапазоне частот, где разрешены параметрические процессы первого или второго порядков для магнитоэлектрических волн (МСВ). Известно, что при возбуждении МСВ в кольцевой системе, параметрические процессы первого порядка могут приводить к генерации узкополосной (примерно 10 МГц) последовательности хаотических релаксационных колебаний [7–9]. Однако при практическом применении важна не только возможность генерации хаотической последовательности, но и способы управления механизмом генерации. В частности, для управления хаотической динамикой кольцевой системы используется подход, заключающийся в регулировании коэффициента усиления кольца (см. работы [4–6,8,9]). Известен также подход, где управление генерацией хаотического сигнала осуществляется за счёт подачи на неавтономную систему внешнего сигнала [10]. Однако применительно к кольцевым системам на основе ферромагнитных плёнок такой механизм управления хаотической генерацией практически не исследован. Можно указать лишь работы [4,9] в этом направлении.

В настоящей работе приведены результаты, демонстрирующие возможность управления хаотической динамикой в кольцевой автоколебательной системе на основе ферромагнитной плёнки в условиях, когда разрешены трехмагнотные процессы распада, за счёт использования внешнего СВЧ-сигнала, находящегося за полосой генерируемого хаотического сигнала.

### Результаты экспериментального исследования неавтономной кольцевой автоколебательной системы с ферромагнитной плёнкой

Экспериментальный макет (рис. 1) исследуемой автоколебательной системы представляет собой последовательно соединенные в кольцо широкополосный твердотельный СВЧ-усилитель мощности на GaAs полевых транзисторах 1, объемный резонатор 2, переменный аттенуатор 3 и перестраиваемую магнитным полем широкополосную нелинейную линию задержки на поверхностных магнитоэлектрических волнах (ПМСВ) 4. Параметры кольцевой системы подобраны таким образом, чтобы генерация сигнала в автономном режиме осуществлялась на одной из кольцевых мод кольца, за счёт использования резонатора в цепи обратной связи, в области частот меньших, чем 3 ГГц, где параметрические процессы распада для ПМСВ разрешены [11].

В автономном режиме, наблюдалась генерация СВЧ-сигнала на частоте  $f_0 = 2597$  МГц. Данной частоте в предгенерационном режиме соответствует максимальное значение коэффициента передачи линии задержки. В случае, когда коэффициент усиления кольца  $G = 0$  дБ ( $G = K - A$ , где  $K$  – ко-

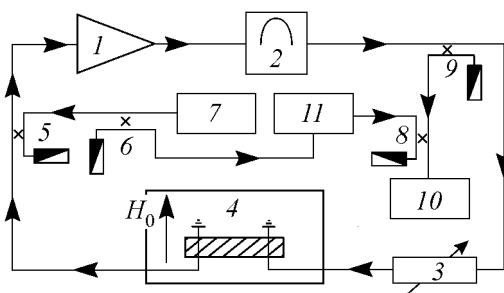


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – транзисторный усилитель мощности; 2 – объемный резонатор; 3 – переменный аттенуатор; 4 – нелинейная линия задержки на ПМСВ; 5, 6, 8, 9 – направленные ответвители для подключения внешнего генератора 7, спектроанализатора 10 и осциллографа 11

ээффициент усиления усилителя  $I$ ,  $A$  – величина ослабления в кольце), в системе генерируется гармонический сигнал. При увеличении коэффициента усиления кольца режим одночастотной генерации сменяется режимом амплитудной автомодуляции сигнала, возникновение которого обусловлено параметрическим возбуждением поверхностной МСВ коротковолновых спиновых волн на частотах, вдвое меньших частоты ПМСВ, и обратным влиянием спиновых волн на ПМСВ [7].

При коэффициенте усиления  $G = 0.5$  дБ на осциллограмме СВЧ-сигнала формируются последовательности цугов с медленно нарастающей и быстро спадающей амплитудой (релаксационные колебания). Возникновение релаксационных колебаний связано с тем, что рост амплитуды сигнала является экспоненциальным за счет наличия активного элемента в кольце. Ограничение экспоненциального роста связано с тем, что нелинейные потери ПМСВ начинают превышать усиление в кольце, и происходит резкий спад амплитуды сигнала. При дальнейшем увеличении коэффициента усиления кольца период релаксационных колебаний сбивается, и наблюдается генерация хаотической последовательности СВЧ релаксационных колебаний (рис. 2, а), которая соответствует коэффициенту усиления кольца  $G = 4$  дБ. Спектр данного сигнала является сплошным с шириной полосы примерно 20 МГц. Следует отметить, что во всех вышеописанных режимах СВЧ-усилитель мощности работал в линейном режиме.

Внешний гармонический сигнал подавался за полосой возбуждения МСВ, на частоте  $f_{\text{ext}} = 2.06$  ГГц. При воздействии на систему внешнего гармонического сигнала малой амплитуды ( $P_{\text{ext}} < -21.1$  дБмВт) поведение системы качественно не отличается от автономного режима. При увеличении уровня мощности входного сигнала до  $P_{\text{ext}} = -13.5$  дБмВт (рис. 2, б) на осциллограмме СВЧ-сигнала формируется периодическая последовательность цугов релаксационных колебаний с двумя характерными амплитудными масштабами – цикл периода 2. При дальнейшем увеличении амплитуды внешнего воздействия наблюдается появление циклов периода 1 (рис. 2, в). При этом на спектре сигнала на фоне шумового пьедестала начинают появляться дискретные составляющие. При  $P_{\text{ext}} = -13.2$  дБмВт (рис. 2, г) спектр сигнала сужается и становится дискретным. На временной реализации наблюдается режим периодической амплитудной модуляции, близкий к гармонической.

При  $P_{\text{ext}} = -12.9$  дБмВт (рис. 2, д) модуляция сигнала пропадает и наблюдается режим одночастотной генерации. При дальнейшем увеличении мощности внешнего сигнала наблюдается прекращение генерации в кольцевой системе.

Сценарий перехода от хаотической динамики к регулярной напоминает сценарий перехода для автономной системы [8], наблюдающийся при уменьшении коэффициента усиления кольца. Последнее может быть объяснено тем обстоятельством, что на вход СВЧ-усилителя мощности подается сумма двух сигналов: сигнала, генерируемого в кольце, и внешнего СВЧ-сигнала. Причём мощность генерируемого в кольце сигнала соответствует линейному участку на динамической характеристике усилителя, в то время как уровень мощности внешнего сигнала соответствует области насыщения. При таком соотношении уровней мощностей сигналов, при увеличении амплитуды внешнего сигнала наблюдается уменьшение коэффициента усиления кольца для сигнала малой амплитуды (генерируемого в кольце).

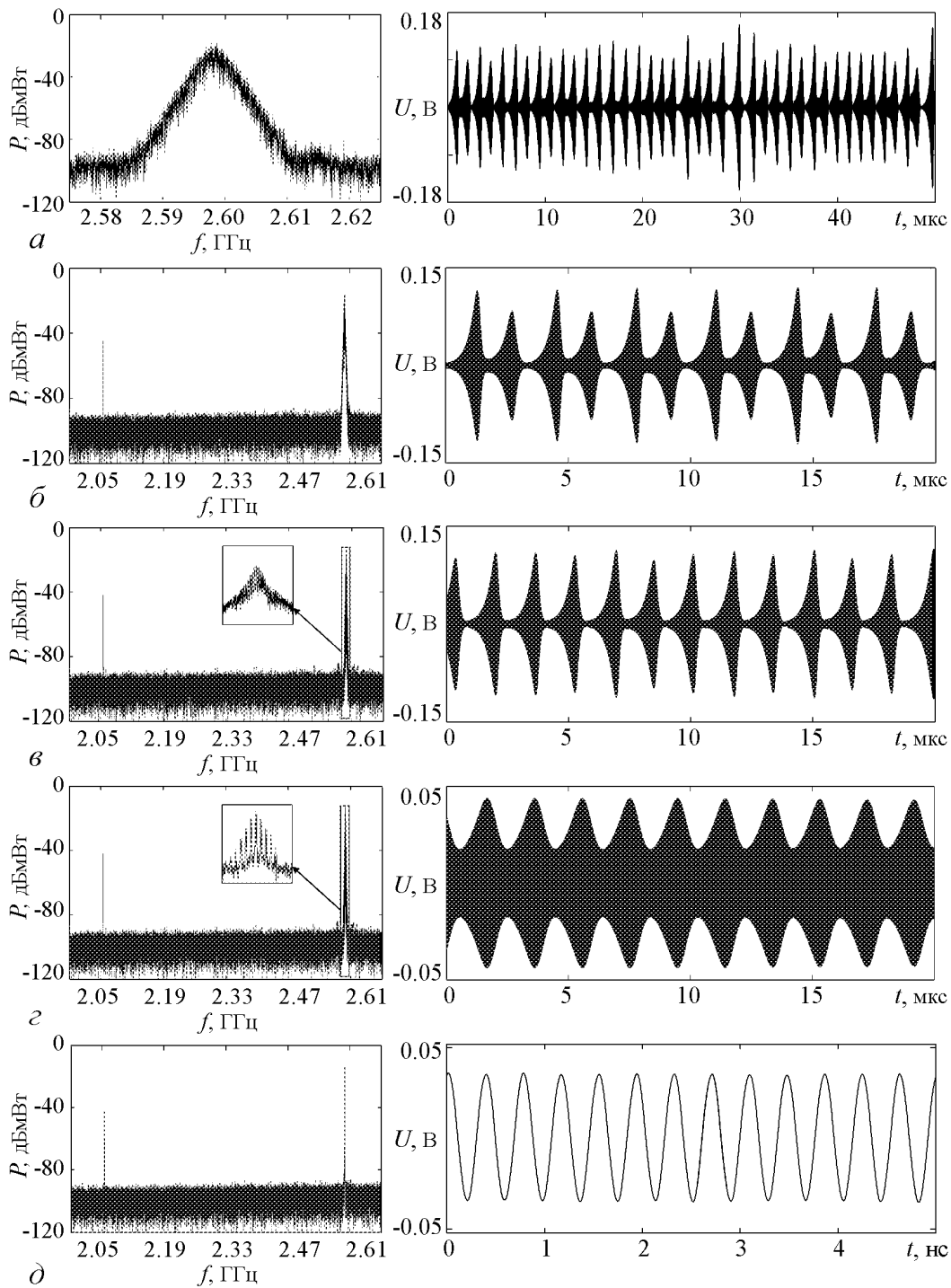


Рис. 2. Спектры мощности (левая колонка), временные реализации (правая колонка) СВЧ-сигнала, генерируемого на одной кольцевой моде в автономном режиме (а) и при разных мощностях  $P_{\text{ext}}$  внешнего гармонического воздействия:  $-13.5$  дБмВт (б),  $-13.4$  дБмВт (в),  $-13.2$  дБмВт (г),  $-12.9$  дБмВт (д)

## Результаты численного моделирования

Для детального выяснения механизма управления в рассматриваемой схеме использована модель автономной автоколебательной кольцевой системы с ферромагнитной плёнкой [8], в которую добавлено внешнее воздействие. Модель описывает параметрическое трёхволновое взаимодействие поверхностной МСВ накачки  $m(t)$  с параметрически возбуждаемыми тепловыми СВ  $b_1(t), b_2(t)$  с учётом влияния внешнего сигнала, частота которого может отличаться от частоты генерируемого сигнала. Система уравнений для описания указанной модели может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= -c_0 b_1(t) b_2(t) \exp(-i\delta t) - \alpha m(t) + \gamma [1 - f(m(t-\tau))] m(t-\tau) + A_{\text{ext}}(t) \exp(i\chi t), \\ \frac{db_1(t)}{dt} &= c_1 m(t) b_2^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_1(t), \\ \frac{db_2(t)}{dt} &= c_2 m(t) b_1^*(t) \exp(i\delta t) - \nu b_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$  – отстройка частоты обменных СВ от половинной частоты МСВ;  $\nu$  – коэффициент затухания спиновых волн;  $\gamma$  – линейный коэффициент усиления;  $\tau$  – задержка в цепи обратной связи;  $f$  – функция, характеризующая нелинейность усилителя;  $\alpha$  – коэффициент линейного затухания МСВ;  $A_{\text{ext}}(t)$  – амплитуда внешнего воздействия;  $\chi$  – расстройка между частотой внешнего воздействия и частотой МСВ.

Система дифференциальных уравнений (1) решалась методом Рунге–Кутты 4-го порядка. Коэффициенты в уравнениях были рассчитаны для параметров экспериментального макета по формулам, приведённым в [8], и были равны:  $\delta = 0.2$  МГц,  $\nu = 7$  МГц,  $\alpha = 7$  МГц,  $\tau = 95$  нс,  $c_0 = 1162$  МГц,  $c_1 = c_2 = 750$  МГц,  $\chi = 24$  МГц. Начальным был выбран режим генерации хаотической последовательности релаксационных колебаний, наблюдаемых при коэффициенте усиления  $G' = 1.99$  дБ ( $G' = 20(\gamma - \alpha)\tau / \text{Ln}(10)$ ). На рис. 3 изображены амплитуды огибающих МСВ и СВ, а также фазовый портрет МСВ. Хаотическая природа генерируемой последовательности колебаний подтверждается расчётом старшего ляпуновского показателя

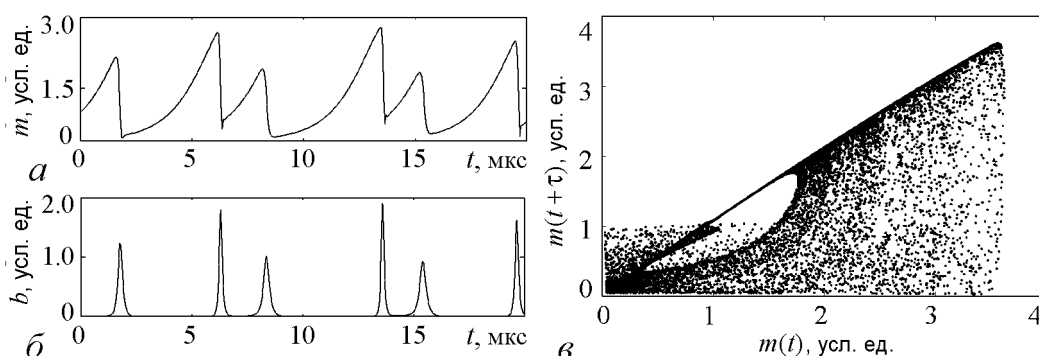


Рис. 3. Временные реализации огибающей МСВ (а), огибающей СВ (б) и фазовый портрет (в) огибающей МСВ, наблюдаемые в автономном режиме при коэффициенте усиления  $G' = 1.99$  дБ

по алгоритму Бенеттина [12]. Известно, что наличие положительного старшего ляпуновского показателя свидетельствует о присутствии неустойчивости или хаоса в динамической системе [13]. Для представленного на рис. 3 случая старший ляпуновский показатель  $\Lambda$  равнялся 0.88.

При расчёте динамики неавтономной системы в качестве внешнего воздействия был выбран гармонический сигнал. При малой амплитуде внешнего воздействия ( $A_{\text{ext}} = 0.3$ ) гармонический сигнал практически не изменяет динамику системы (рис. 4. *a*). Значение старшего ляпуновского показателя  $\Lambda = 0.49$  меньше, чем в автономном режиме, но остается положительным.

При увеличении амплитуды внешнего воздействия до  $A_{\text{ext}} = 0.395$  (рис. 4. *б*) наблюдается появление периодического режима – цикла периода 8. Циклы с меньшими периодами (4 и 2) появляются при дальнейшем увеличении амплитуды внешнего

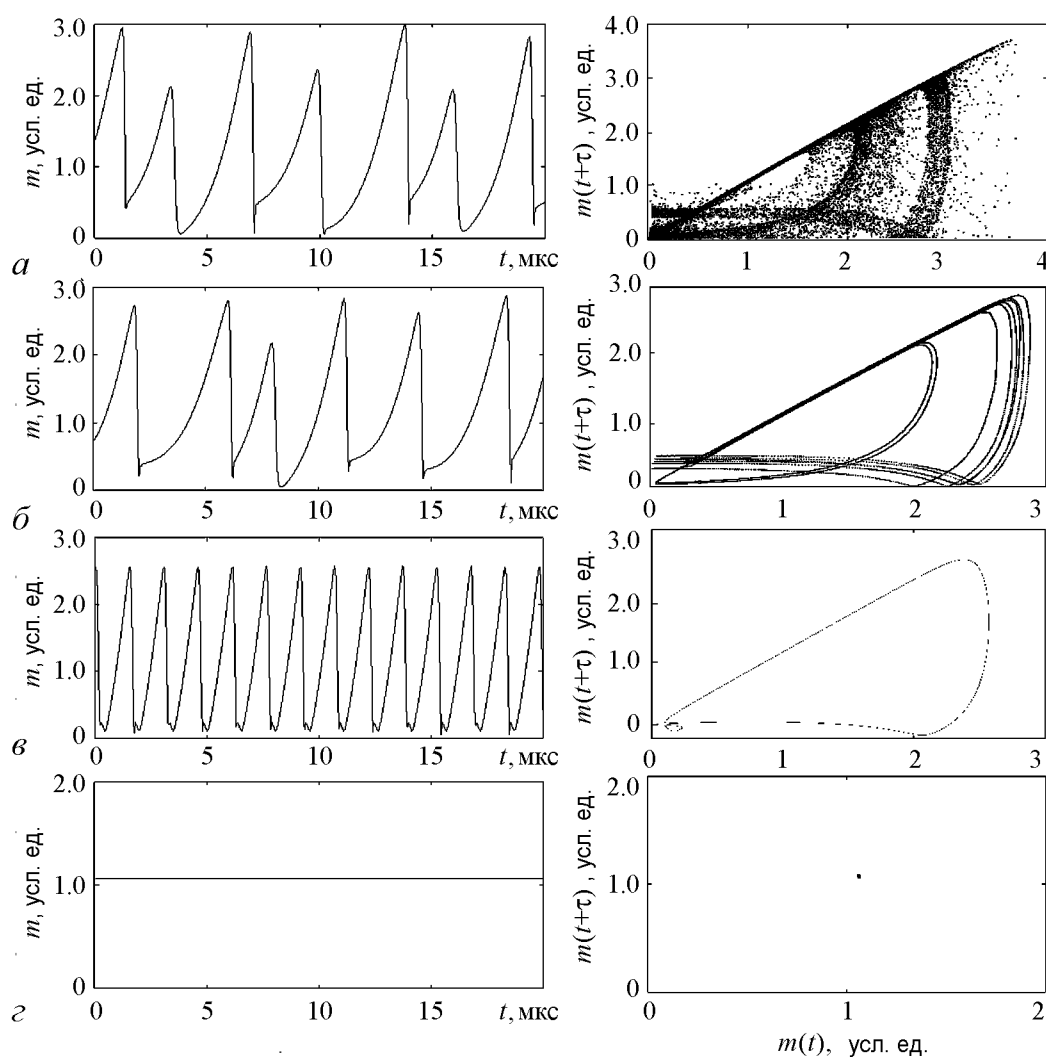


Рис. 4. Временные реализации огибающей МСВ (слева) и соответствующие им фазовые портреты (справа) при различных значениях амплитуды  $A_{\text{ext}}$  внешнего воздействия: *a* – 0.3, *б* – 0.395, *в* – 0.21, *г* – 0.23

воздействия. На рис. 4, в изображен цикл периода 1, наблюдаемый при амплитуде внешнего воздействия  $A_{\text{ext}} = 0.21$ .

Наблюдаемый сценарий перехода при численном моделировании качественно совпадает с результатами эксперимента, приведенными на рис. 2, б, в. Увеличение амплитуды внешнего воздействия до  $A_{\text{ext}} = 0.23$  приводит к подавлению хаотической динамики и переходу к одночастотному режиму (рис. 4, г). В этом случае амплитуда огибающей сигнала не зависит от времени, а фазовый портрет представляет собой точку. Данный режим соответствует одночастотному режиму в эксперименте (см. рис. 2, д).

Из проведенного исследования следует, что использование гармонического внешнего сигнала позволяет управлять динамикой кольцевой системы на основе ферромагнитной плёнки.

Выражаю благодарность Ю.П. Шараевскому и С.В. Гришину за ценные обсуждения и помощь в осуществлении экспериментальных исследований.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00057), гранта правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (проект № 11.G34.31.0030) и гранта РФФИ для поддержки молодых учёных (12-07-31009).*

#### **Библиографический список**

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2002. 252 с.
2. Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций. Учебник-монография. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 312 с.
3. 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.
4. Гришин С.В., Гришин В.С., Храмов А.Е., Шараевский Ю.П. Генерация широкополосного хаотического сигнала в автоколебательной системе с нелинейной линией передачи на магнитостатических волнах // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 5. С. 89.
5. Кондрашов А.В., Устинов А.Б., Калинин Б.А., Веннер Н. Автогенерация хаотического СВЧ-сигнала в активных кольцах на основе ферромагнитных пленок // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 11. С. 81.
6. Wu M., Hagerstrom A.M., Eykholt R., Kondrashov A., and Kalinikos B.A. Excitation of chaotic spin waves through modulational instability // Phys. Rev. Letters. 2009. Vol. 102, article 237203-1–237203-4.
7. Гуревич А.Г., Мелков Г.А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
8. Демидов В.Е., Ковшиков Н.Г. Механизм возникновения и стохастизации автомодуляции интенсивных спиновых волн // ЖТФ. 1999. Т. 69, № 8. С. 100.
9. Романенко Д.В. Генерация хаотической последовательности свч-импульсов в

автоколебательной системе с ферромагнитной плёнкой // Известия вузов. ПНД. 2012. Т. 20, № 1. С. 67.

10. *Sergey V. Grishin, Yurii P. Sharaevskii, Sergey A. Nikitov and Dmitrii V. Romanenko.* Generation of chaotic microwave pulses in ferromagnetic film ring oscillators under external influence // IEEE Transaction on magnetic. 2013. Vol. 49, № 3. P. 1047.
11. *Неймарк Ю.И. Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 С.
12. *Benettin G., Galgani L., Strelcyn J.M.* Kolmogorov entropy and numerical experiment // Phys. Rev. A. 1976. Vol. 14, № 6. P. 2338.
13. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001.

*Саратовский госуниверситет  
им. Н.Г. Чернышевского*

*Поступила в редакцию 19.03.2013*

## **CONTROL OF A CHAOTIC MICROWAVE SIGNAL GENERATION IN NONAUTONOMOUS RING SYSTEM BASED ON A FERROMAGNETIC FILM**

*D. V. Romanenko*

Experimental investigation results of the nonautonomous active ring system based on a ferromagnetic film at three-wave interactions were considered. The possibility of system dynamics controlling by the external harmonic signal was shown. A comparison of experimental data with simulation results was done.

*Keyword:* Ferromagnetic structure, self-oscillatory system, chaos, three-magnon processes.



*Романенко Дмитрий Владимирович* родился в Саратове (1988), окончил Саратовский государственный университет (2010). В 2013 году поступил на работу в НИИМФ ЕН СГУ в качестве младшего научного сотрудника лаборатории «Метаматериалы». Соавтор и автор 4 научных публикаций. Основные области научных интересов: волновая динамика в ферромагнитных структурах, генерация хаотических СВЧ-сигналов, динамический хаос.

410012 Саратов, Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: [dmitrii.romanenk@mail.ru](mailto:dmitrii.romanenk@mail.ru)