

# СЛОЖНАЯ ДИНАМИКА В МНОГОКОНТУРНОМ ГЕНЕРАТОРЕ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Бурашников В. В.<sup>1</sup>, Станкевич Н. В.<sup>1,2</sup>, Селезнев Е. П.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

<sup>3</sup>Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского

Одним из перспективных направлений практического использования радиофизических генераторов сложных колебательных режимов являются системы скрытой передачи данных [1-3]. В рамках данной работы проводится исследование возникновения и развития сложной динамики в многоконтурном генераторе с общей схемой управления, который может быть использован в качестве базового для системы скрытой передачи информации.

Динамика многоконтурного генератора описывается системой из п дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\ddot{x}_i - (\lambda k_i - x_i^2) \dot{x}_i + \Delta_i x_i + \sum_{i=1}^n k_i \dot{x}_i - k_i \dot{x}_i = 0. \quad (1)$$

Здесь  $x_i, \dot{x}_i$  – динамические переменные, характеризующие каждый колебательный контур;  $\lambda$  – параметр, характеризующий возбуждение в каждом колебательном контуре;  $\Delta_i$  – собственные частоты контуров;  $k_i$  – коэффициенты усиления;  $n$  – количество контуров в генераторе, в рассматриваемом случае  $n=5$ . В работе [4] можно найти полное описание схемы генераторы и его параметров. В [4] было показано, что в системе (1) возможно возникновение сложной хаотической динамики на базе разрушения многочастотных квазипериодических колебаний. В рамках данной работы рассмотрим более подробно особенности формирования хаотической динамики.

Для анализа динамики в системе рассмотрим показатели Ляпунова. На рис.1, а представлен график зависимости показателей Ляпунова при фиксированных коэффициентах усиления  $k_2, k_3, k_4, k_5$  и вариации коэффициента  $k_1$ . На рис. 1,а хорошо видно, что возникновение хаотической динамики происходит при уменьшении коэффициента усиления  $k_1$ . На рис. 1,б представлен увеличенный фрагмент в окрестности перехода к хаосу в результате разрушения квазипериодической динамики. При  $k_1=3$  наблюдаются двухчастотные квазипериодические колебания, которым соответствуют два старших нулевых показателя Ляпунова и два отрицательных. На рис. 1,в представлены проекция фазового портрета и спектр Фурье для данного режима, где мы также наблюдаем двухчастотный тор. При  $k_1=2.81$  происходит квазипериодическая бифуркация Хопфа, в результате которой рождается трехчастотный тор. На рис. 1,г мы видим появление дополнительной частоты в спектре, что также соответствует наблюдаемой бифуркации. Затем тор сохраняется в определенном интервале параметра, а затем разрушается с формированием хаотического аттрактора. На рис. 1,д показаны проекция фазового портрета и спектр Фурье для появившегося хаотического аттрактора.

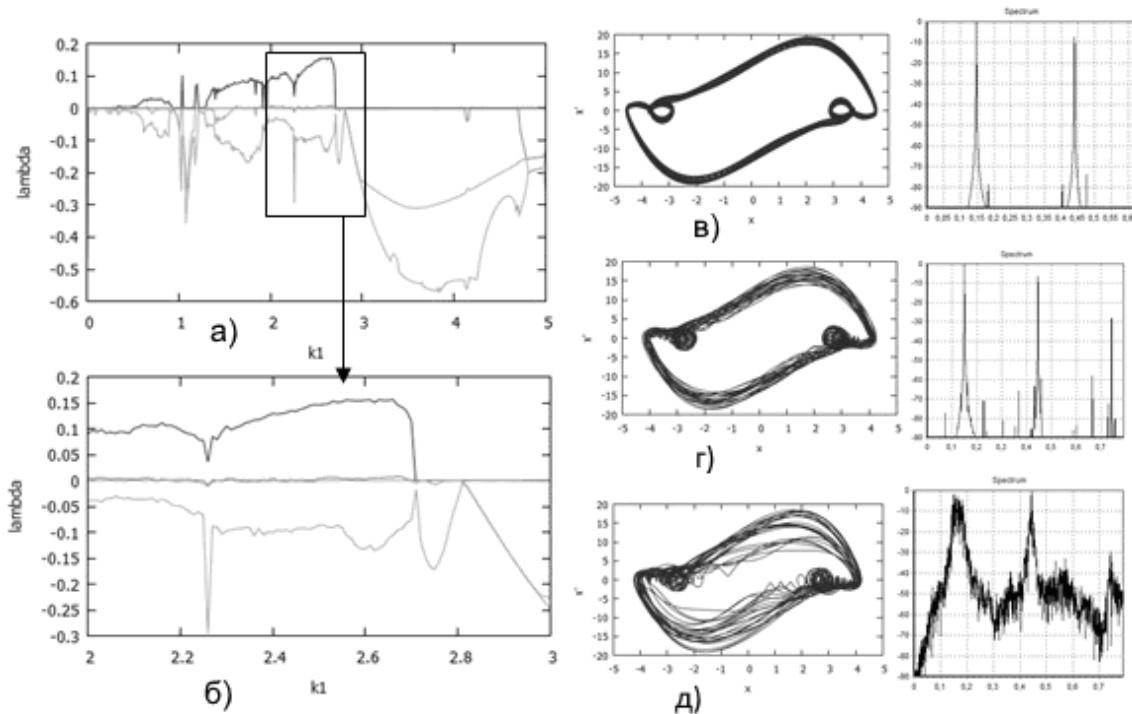


Рис. 1. График четырех старших показателей Ляпунова (а) и его увеличенный фрагмент (б) при  $\lambda=0.5$ ,  $k_2=k_3=k_4=1$ ,  $k_5=0.65$ ; фазовые портреты и спектры Фурье при  $k_1=3$  (в);  $k_1=2.73$  (г);  $k_1=2.7$  (д)

В рамках работы было проведено численное моделирование динамики пятиконтурного генератора. Исследованы особенности формирования хаотической динамики в нем. В рамках работы также будут представлены результаты по исследованию формирования хаоса, а также его особенностей при других значениях параметров на базе квазипериодических колебаний с различным числом несоизмеримых частот. Проведено сравнительное экспериментальное исследование пятиконтурного генератора. В работе будут представлены подробности экспериментальной реализации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект №17-12-01008).*

1. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. – М. : Физматлит, 2002. – 252 с.
2. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // УФН. – 2009. – Т. 179, В. 12. – С. 1281–1310.
3. Караваев А.С., Кульминский Д.Д., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д. Экспериментальная система скрытой передачи информации на генераторе с запаздывающей обратной связью с переключением хаотических режимов // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, В.1. – С.3–11.
4. Станкевич Н.В., Астахов О.В., Кузнецов А.П., Селезнев Е.П. Возбуждение хаотических и квазипериодических колебаний в многоконтурном генераторе с общей схемой управления // Письма в ЖТФ. – 2018. – Вып. 10. – 46–54.
5. Кузнецов А.П., Тюрюкина Л.В., Сатаев И.Р., Станкевич Н.В. Физика квазипериодических колебаний. – Саратов : Наука, 2013. – 252 с.