

ОДНОТРАНЗИСТОРНЫЙ ГЕНЕРАТОР ХАОСА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

С. В. Савельев, ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, e-mail: savelyev@ms.ire.rssi.ru.

Предложен метод построения динамических моделей одностранзисторных систем СВЧ с использованием реальных параметров активных элементов.

Способы создания транзисторных систем с хаотическим поведением диапазона СВЧ кардинально отличаются от построения аналогичных систем на основе электровакуумных приборов, основополагающие принципы которого заложены в классическом шумотроне. Такое различие определяется параметрами транзисторов СВЧ, и как результат - невозможность организовать падающий участок динамической характеристики нелинейного усилителя, что является необходимым и достаточным условием работы шумотрона в хаотическом режиме. Транзисторные системы СВЧ такими свойствами не обладают. Поэтому, представляет интерес проблема разработки и создания динамической модели регенеративного усилительного одностранзисторного каскада диапазона СВЧ, являющегося простейшей составной частью любого устройства СВЧ на биполярных транзисторах, переходящего в автоколебательный режим при выполнении условий самовозбуждения. Параметры модели должны иметь физический смысл и значения параметров реального устройства. Параметрами усилительного каскада, которые возможно реально измерить в эксперименте и рассчитать теоретически, являются вид динамической характеристики и инерционность. Динамическую характеристику регенеративного усилительного каскада СВЧ можно представить в виде кусочно-линейной функции, имеющей линейный участок и участок с насыщением. Основной вклад в инерционность усилительного каскада в может вносить как эмитерный так и коллекторный переходы транзистора, в зависимости от режима работы активного элемента. Актуальным с точки зрения генерации сложных сигналов является режим близкий к насыщению, когда основная инерционность каскада СВЧ сосредоточена в коллекторе.

Исследования систем с инерционностью широко представлены в научной литературе из-за демонстрируемой ими богатой динамики (например, [1 - 12]). Наличие инерционности и возможность использования усилительных элементов с различными характеристиками позволяет их использование в качестве динамических моделей регенеративных усилительных каскадов диапазона СВЧ. В работе численными методами исследуется система с выделенной инерционностью

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Y + (m_1 - m_2)X - XZ, & X \leq q \\ \dot{X} &= Y - m_2X - qZ, & X > q \\ \dot{Y} &= -X \\ \dot{Z} &= -gZ + gF(X)X^2 \end{aligned} \tag{1}$$

где $F(X)$ - функция Хевисайда, m_1, m_2, q, g - параметры возбуждения, диссипации, ограничения и инерционности соответственно. От [1, 2] систему (1) отличает форма динамической характеристики нелинейного усилителя, которая имеет линейный участок при $X \leq q$, и участок с насыщением при $X > q$, что соответствует реальным системам СВЧ. Четвертое уравнение описывает инерционный однополупериодный инерционный преобразователь.

Развитие колебательного процесса в системе (1) изучено в [9, 10]. В настоящей работе нас будет интересовать развитые хаотические режимы колебаний с дифференциальным законом распределения плотности вероятности близким к нормальному Гауссову. Как следует из [8], такие колебательные режимы наблюдаются в системе случае $m_1 = 1,6, m_2 = 0,1, q = 0,05$ и $g \leq 0,06$. Уменьшение параметра инерционности от указанного выше значения приводит к входу в зону развитых хаотических колебаний. Вид аттрактора в фазовом пространстве системы определяется петлей седло – фокус с переходящим характерным движением вдоль седловой сепаратриссы. Это означает, что в системе присутствует амплитудная и фазовая неустойчивости генерируемых колебаний. Дифференциальный закон распределения плотности вероятности колебательного близок к нормальному, фурье - спектр достаточно ровный без выделения каких-либо регулярных

составляющих, рис. 1. Однако удаление вглубь зоны хаотических колебаний приводит к нарастанию положительного эксцесса в распределении плотности вероятности до значения $\varphi = 1,45$. Это объясняется тем, что хаотические колебания системы имеют пиковый характер. При удалении от границы развитого хаоса система более долгое время проводит вблизи положения равновесия.

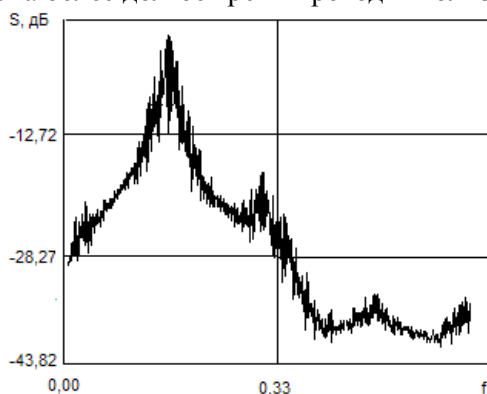


Рис. 1

Эксперименты проводились в сантиметровом диапазоне длин волн. Регенеративный усилитель, переходящий в автогенераторный режим за счет изменения коэффициента усиления путем варьирования значений напряжений питания, был собран по планарной микрополосковой технологии на базе транзистора 2Т 982 А-2 включенного по схеме с общей базой и согласованного по входу и выходу. Положительная обратная связь организовывалась только за счет внутренних емкостей транзистора. Напряжения питания коллектор-база и эмиттер-база предусматривали их отдельные регулировки, что позволяло добиться максимально возможного набора автоколебательных режимов системы. Диапазон напряжений $-1,4\text{В} < U_{\text{сб}} < -0,7\text{В}$ отвечал автогенераторным режимам регенеративного усилительного каскада. Изменение значений напряжения в эксперименте $3,6\text{В} < U_{\text{кб}} < 17,5\text{В}$ в наибольшей степени соответствовало изменению параметров инерционности и ограничения системы. Значения параметров системы (1), при которых наблюдались развитые хаотические колебания, указывают, что сложные режимы колебаний в эксперименте можно наблюдать при работе транзистора в сильно перенапряженном режиме. Так на рис.2 приведен спектр хаотических колебаний регенеративного усилительного каскада СВЧ в генераторном режиме при $U_{\text{кб}} = 4,2\text{В}$, $U_{\text{сб}} = 1,35\text{В}$.

Эффективная ширина спектра хаотических колебаний равна полосе усиления регенеративного усилительного каскада в недовозбужденном режиме. Расчетное значение параметра инерционности $g < 0,1$. Спектр колебаний сплошной с малым перепадом спектральной плотности. Неравномерность спектральной плотности шума не превышала 2 дБ/мВт при относительной ширине полосы порядка 0,1 октавы. 90% мощности сигнала системы находилось в полосе частот усиления регенеративного усилителя.

Интегральная мощность сигнала составляла 5 – 7% от мощности сигнала системы в случае регулярного сигнала.

Предложенная методика позволяет производить построение адекватных динамических моделей транзисторных систем СВЧ. При использовании значений параметров реальных систем это позволяет моделировать динамику реальных устройств в процессе её разработки.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №

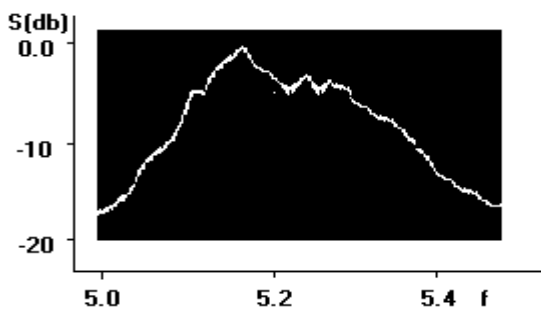


Рис. 2

08-07-00298).

Литература

1. Анищенко В.С., Астахов В.В., Летчфорд Т.Е. // ЖТФ. 1983. Т. 53. В 1. С. 152.
2. Анищенко В.С. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 10. С. 629.
3. Максимов Н.А., Кислов В.Я. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 16. С. 979.
4. Мясин Е.А., Панас А.И. // РЭ. 1983. Т. 28. № 12. С. 2423.
5. Неймарк Ю.И. Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987, 424 С.
6. Дмитриев А.С., Кислов В.Я. Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989, 280 С.
7. Савельев С.В. // РЭ. 1992. Т.37. № 6. С.1064.
8. Кислов В.Я., Савельев С.В. // РЭ. 1994. Т.39. № 6. С.963.
9. Н.А. Максимов, С.В. Савельев. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 17. С. 72 – 77.
10. Максимов Н.А., Панас А.И., Савельев С.В. Однотранзисторный генератор хаоса сверхвысоких частот. // 14-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004). Севастополь, 13-17 сентября 2004 г.: Материалы конференции. – Севастополь: «Вебер», 2004. С. 132 – 133.
11. Sergey V. Savel'ev, Nikolay A. Maksimov. Bifurcation phenomena with additive increase in the oscillation period in a system with one a half degrees of freedom. // 2nd IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. June 30 – July 2. 2004. Moscow, Russia.
12. Савельев С.В. Генератор хаотических колебаний сверхвысоких частот для систем передачи информации. // 10-я Международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и её применение. Россия, Москва, 26 – 28 марта 2008 г. Труды РНТОРЭС имени А.С. Попова. С. 205 – 208.