

Энергетика генераторов шума

С.В. Савельев, В.В. Сизов, В.С. Смирнов

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова российской академии наук; Фрязино, пл. Введенского, 1; e-mail: savelyev@ms.ire.rssi.ru.

Впервые теоретически и экспериментально исследуются причины уменьшения значения выходной мощности и КПД при генерировании хаотических колебаний в однотранзисторных генераторах большой мощности по сравнению с их регулярными режимами автоколебаний. Установлено, что уменьшение энергетических параметров связано с механизмом генерации хаоса в таких системах представляющим собой последовательность цугов с произвольным числом колебаний и случайной начальной фазой. Установлены численные значения падения КПД таких систем при переходе в хаотический режим.

For the first time the reasons of reduction of value of output power and efficiency are theoretically and experimentally investigated at generation of chaotic fluctuations in one-transistor generators of big power in comparison with their regular modes of self-oscillations. It is established that reduction of power parameters is connected with the mechanism of generation of chaos in such systems representing sequence of tsug with any number of fluctuations and a casual initial phase. Numerical values of falling of efficiency of such systems are established upon transition to the chaotic mode.

Генерация хаотических микроволновых колебаний в системах на мощных биполярных транзисторах характеризуется тем, что в таких системах наблюдается уменьшение выходной мощности хаотического сигнала и КПД генераторов по сравнению со значениями вышеназванных энергетических параметров в аналогичных системах, работающими в режиме генерации регулярных колебаний. При этом в экспериментах максимальные значения мощности и КПД при генерации хаотических колебаний не превышают 40% от значения последних в этих же системах при работе в режиме генерации регулярного сигнала. Существенное изменение энергетических характеристик в меньшую сторону при смене режима автогенератора с регулярного на хаотический с необходимостью ставит вопрос об изучении механизма такого изменения.

Особенностью работы мощных биполярных транзисторов состоит в сильной зависимости значений параметров транзистора от рабочего тока. Так импедансы и коэффициент усиления по току транзистора в первом приближении обратно пропорциональны силе тока [1]. Кроме того, разброс значений параметров мощных транзисторов микроволнового диапазона высок по сравнению с транзисторами малой и средней мощности и составляет не менее 35%. Такое положение вещей объясняет факт отсутствия значений параметров мощных транзисторов в библиотеках готовых программных пакетов, например, таких как Cadence IC или Electronic WorkBench 5.12, которые являются на настоящее время наиболее мощным и распространенным инструментом для моделирования электронных систем. Невозможность использования таких программ для моделирования систем на мощных биполярных транзисторах не позволяет детально установить изменения, которые происходят в таких системах микроволнового диапазона при переходе от регулярного режима генерации к хаотическому.

В настоящей работе на основе исследования экспериментальных реализаций колебательных процессов выявляются главные причины уменьшения энергетических характеристик микроволновых генераторов при изменении их режима генерации колебаний от регулярного к хаотическому.

Эксперименты проводились с однотранзисторным генератором на базе отечественного мощного биполярного транзистора 2Т 982 А-2, детальные исследования по генерации регулярных и хаотических колебаний которого было проведено в [2]. Транзистор 2Т 982 А-2 конструктивно предназначен для работы в схеме с общей базой. Эмиттер и коллектор транзистора подключены к выполненным по планарной микрополосковой технологии элементам топологии согласующие входной и выходной импедансы транзистора с 50-омными подводными линиями. Топологии для эмиттерной и коллекторной цепей выполнены на подложках из поликора толщиной 1 мм. Размеры подложек составляли 24 x 15 мм. Рисунок топологии согласующих элементов в целом повторял форму топологии представленную в [2], при условии перерасчета элементов согласования на частоту 5,0 МГц. Выбор центральной частоты был продиктован возможностями измерительной аппаратуры.

Как было установлено в работе [3], регенеративный усилительный каскад на мощном транзисторе 2Т 982 А-2 может переходить в режиме автогенерации регулярных колебаний при следующих величинах напряжений питания: напряжение на коллекторе $U_{БК} = 6,8 - 17,5В$, напряжение на эмиттере $U_{БЭ} = - 0,8 - - 1,3В$. В модельных экспериментах с генератором с выделенной инерционностью представлены теоретические предпосылки возможности генерации микроволнового хаоса в таких системах. Так регенеративный усилительный каскад может переходить в автогенераторный хаотический режим вблизи верхней рабочей частоты транзистора, когда центральная рабочая частота усилительного каскада f отвечает условию $2\pi f \in [0,6\omega_N; \omega_N]$, где ω_N – частота отсечки коэффициента усиления, составляющая для транзистора 2Т 982 А-2 7,5ГГц.

В настоящей работе проводился сравнительный анализ временных реализаций регулярных и хаотических выходных сигналов генератора на транзисторе 2Т 982 А-2 при одинаковых напряжениях питания. Реализация перехода от регулярного к хаотическому режиму колебаний достигалась путем незначительного, порядка 1%, изменения импедансов элементов согласования транзистора. Такое изменение элементов согласования на практике не приводило к значимому, более 3%, изменению рабочего тока транзистора при переходе режима генератора от регулярного к хаотическому, что позволяло в первом приближении считать неизменным мощность, потребляемую от источников питания при регулярном и хаотическом режиме работы генератора.

На рис. 1 представлены реализации колебаний генератора в случае регулярного одночастотного, рис. 1, а, и хаотического, рис. 1, б, режима автоколебаний. Соответствующие спектры мощности колебательных процессов представлены на рисунке 1 справа от реализаций.

Рис. 1, б показывает, что в режиме развитых хаотических колебаний временная реализация представляет собой последовательность цугов колебаний. Цуги колебательного процесса в этом случае имеют произвольную длительность и характеризуются случайной начальной фазой.

Считая равными по значению величины мощности, потребляемые от источников питания при регулярном и хаотическом режиме работы генератора, проведем сравнительный анализ выходных мощностей колебательных процессов, изображенных на рис. 1.

Для нормализованных амплитуд колебательных процессов, для случая равенства значений импедансов нагрузок, можно записать отношение КПД для хаотического и регулярного одночастотного колебательного процесса в рассматриваемом генераторе:

$$\frac{\eta_x}{\eta_p} = \frac{\int_0^T F(t) \cdot \sin^2 \omega t dt}{\int_0^T \sin^2 \omega t dt}, \quad (1)$$

где η_x и η_p - значения КПД для случаев хаотического, рис. 1, б, и одночастотного регулярного, рис. 1, а, режимов работы генератора соответственно,

T – длительность одного рассматриваемого цуга,

ω - центральная частота работы генератора, функция $F(t)$ является функцией огибающей максимальных значений амплитуды в одном цуге.

Для случая, когда:

$$F(t) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi t}{T}\right), \quad (2)$$

что на практике является наиболее точной экстраполяцией функции огибающей цуга хаотического колебательного процесса, вычисление соотношения (1) для вида функции огибающей (2) дает значение $3/8$. Это означает, что значение КПД для случая хаотической динамики в виде представленной на рис. 1, б в рассматриваемой автоколебательной системе равно 37,5% от значения КПД для регулярной динамики колебательного процесса.

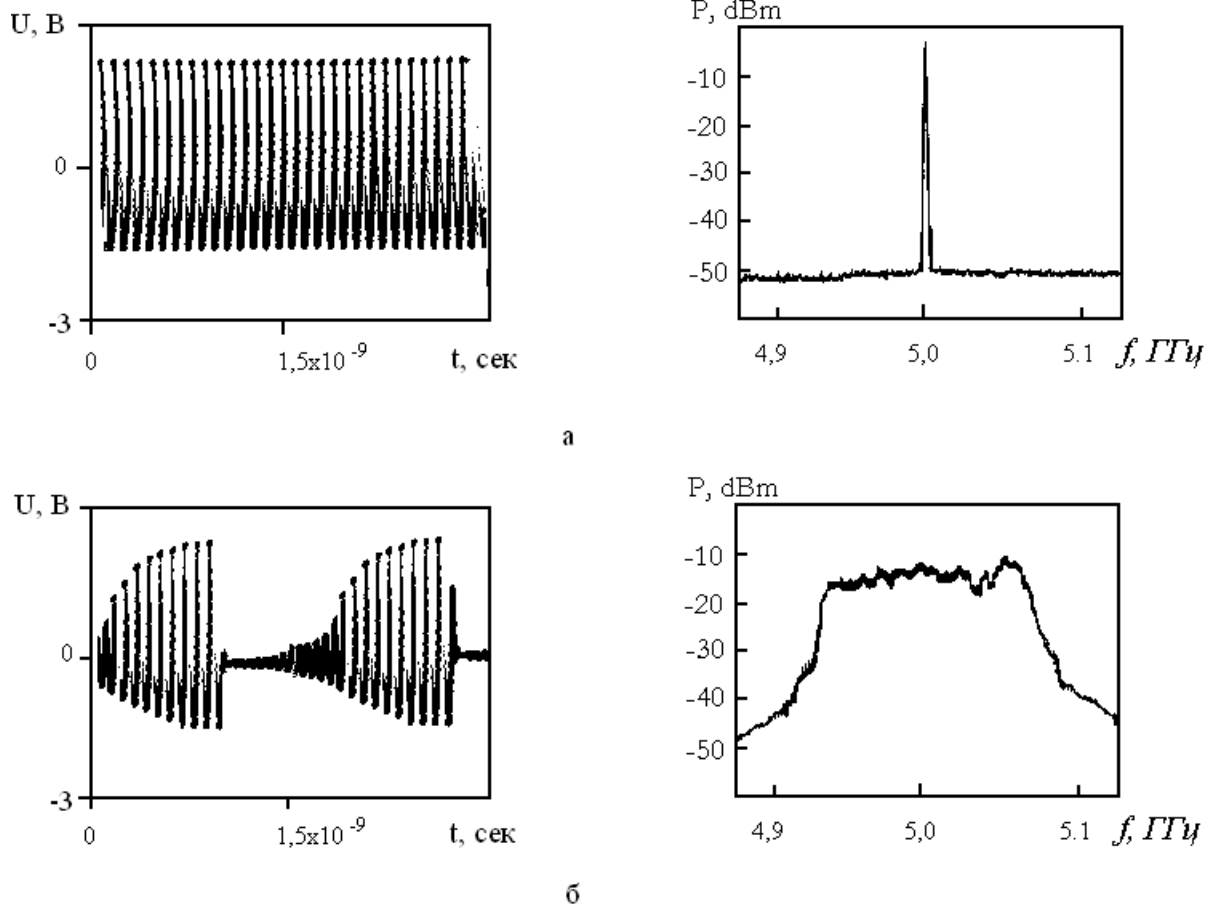


Рис.1. Реализации и соответствующие им спектры мощности для регулярного (а) хаотического (б) сигналов генератора

Авторами производилось натурное измерение энергетических характеристик генератора для регулярного и хаотического процессов отвечающих реализациям на рис.

1. Реализации и соответствующие им спектры мощности генератора получены при напряжениях питания на коллекторе $U_{БК} = 7,8$ В и на эмиттере $U_{БЭ} = - 1,28$ В и потребляемом токе 270 мА. Значения выходных мощностей составляли 530 и 210 мВт для регулярного и хаотического сигналов соответственно.

С точки зрения процессов происходящих в транзисторе, переход от регулярных к хаотическим колебаниям сопровождается увеличением времени рассасывания неосновных носителей в высокоомном коллекторном слое транзистора, а значит увеличение инерционности в выходной цепи автогенератора. Процесс генерации хаотических колебаний в системе сопровождался возникновением двухчастотного режима автогенерации в полосе усилительного каскада и незначительным увеличением рабочего тока транзистора, а значит увеличением инерционности в коллекторной цепи транзистора. В спектре мощности возникала сетка частот с эквидистантной расстановкой составляющих на комбинации основных частот, что говорит о повышении степени нелинейности автоколебательного процесса при генерации хаотических колебаний. Далее система демонстрировала ряд бифуркаций периода колебаний по закону натурального ряда, что согласуется с результатами, полученными в [3], и жестко переходила к хаотическим колебаниям со сплошным спектром.

Усреднённая спектральная плотность генерируемых шумовых колебаний микроволнового хаоса, рис. 1, б, составила $1,1 \cdot 10^{-3}$ Вт/МГц. Вычисления КПД для регулярного и хаотического сигналов на рис. 1 дали значения 23 и 9% соответственно. Отношение значений КПД генератора для случая хаотической и регулярной динамики составило 0,4, что хорошо согласуется со значением, полученным теоретически.

В настоящей работе на основе проведенного теоретического анализа характеристик экспериментальных реализаций генераторных процессов для регулярного и хаотического режима автогенерации в микроволновой одностранзисторной системе показано, что максимальные значения КПД мощных автогенераторов хаоса не превышают 37,5% от значения последнего в случае работы автогенератора при генерации регулярных автоколебаний. Причины уменьшения значений энергетических характеристик при переходе к хаосу связан с механизмом возникновения хаотических колебаний в таких системах, который основан на генерации последовательности цугов колебаний с различным количеством единичных колебаний и произвольной начальной фазой. При этом при переходе от регулярных колебаний к хаотическим не происходит значительного изменения рабочего тока транзистора из-за увеличения инерционности в коллекторной цепи транзистора, а значит и увеличения степени нелинейности автоколебательной системы.

Теоретические оценки изменения энергетических характеристик исследуемого микроволнового автогенератора при переходе от регулярного одночастотного режима генерации к хаотическому хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Москва. «Мир». 1984. Книга 1. Изд. № 20/2918. Ч. 2, гл. 3, с. 190. (S.M. Sze. Physics of Semiconductor Devices. New Jersey. Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill. 1981.)
2. Савельев С.В. Микроволновые колебания в системе на мощном биполярном транзисторе. // Электронная техника. Серия: Электроника СВЧ. 2012. Вып. 3 (514). С. 41 – 45.
3. Савельев С.В. Регулярная и хаотическая динамика генераторов сверхвысоких частот на биполярных транзисторах большой мощности. // РЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850 – 858.