

Генерация шумовых колебаний на сверхвысоких частотах в транзисторных регенеративных усилительных системах

С. В. Савельев

ФИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, пл. Введенского 1, e-mail: savelyev@ms.ire.rssi.ru

Предложена методика построения источников широкополосных и сверхширокополосных шумовых колебаний в диапазоне сверхвысоких частот на основе регенеративных усилительных каскадов. Представлены модели для описания динамики таких систем и результаты экспериментальных исследований.

The method of creation of chaotic generators in a range of a microwave on the basis of one-transistor cascades is offered. Models for the description of dynamics and results of experimental researches of such systems are presented.

Множество разработанных усилителей диапазона СВЧ велико и разнообразно. Все такие приборы из-за специфики их построения и элементной базы являются регенеративными, то есть легко переходят в генераторный режим при небольшой смене внешних воздействующих параметров, таких как напряжения питания, условия согласования и др. Представляет интерес использовать такие системы в качестве задающих генераторов широкого применения, в том числе генераторов хаотических колебаний. Первые попытки создания биполярных одностранзисторных генераторов хаоса были представлены в [1 - 8].

Способы построения систем с хаотическим поведением диапазона СВЧ на биполярных транзисторах кардинально отличаются от таковых на низких частотах. Различие определяется параметрами транзисторов СВЧ. В отличие от низкочастотных систем, имеющих большой динамический диапазон и как результат - возможность организовать падающий участок динамической характеристики нелинейного усилителя, что является необходимым и достаточным условием генерации хаоса, транзисторные системы СВЧ такими свойствами не обладают. Низкий коэффициент усиления транзисторов (не более 10 дБ) и распределенная схема подводных линий, имеющая место уже в дециметровом диапазоне, исключает возможность применения классической низкочастотной схемотехники генераторов хаоса и традиционной схемы шумотрона с целью создания транзисторных источников СВЧ.

Таким образом, представляет интерес создание методики расчета генераторов хаотических колебаний на основе существующих регенеративных усилителей и создания на их основе одностранзисторных генераторов хаотических колебаний.

В общем виде одностранзисторный регенеративный усилительный каскад СВЧ диапазона представляет собой нелинейный усилитель с положительной обратной связью и динамической характеристикой, которая имеет линейный участок и участок с насыщением и инерционность, определяемую как входной, так и выходной цепями транзистора. Значения параметров инерционности во входной и в выходной цепях имеют прямую зависимость от тока транзистора.

В случае малых токов, когда параметры активных элементов не зависят от их токов, основной вклад в инерционность вносит входная цепь транзистора. Тогда одностранзисторный регенеративный усилитель описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений с 1,5 степенями свободы с входной инерционностью [1 - 3, 5, 6]:

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

где $F(X)$ - единичная функция Хевисайда, m_1, m_2, q, g - параметры возбуждения, диссипации, ограничения и инерционности соответственно. Система уравнений (1) описывает динамику RLC генератора с индуктивной обратной связью и инерционным преобразованием входного сигнала нелинейного усилителя, где безразмерные переменные уравнений суть: X - напряжение на входе нелинейного усилителя, Y - ток в цепи обратной связи, Z - напряжение на выходе однополупериодного инерционного преобразователя. От модифицированного генератора с инерционностью систему отличает форма динамической характеристики нелинейного усилителя, которая имеет линейный участок при $X \leq q$, участок с насыщением при $X > q$ и не имеет падающего участка. Первые три уравнения описывают процессы в нелинейном усилителе с обратной связью на линейном участке и при ограничении. Четвертое уравнение описывает инерционный однополупериодный преобразователь. Динамика системы определяется двумя механизмами ограничения колебаний. Первый механизм - безинерционный и связан с нелинейностью характеристики усилительного элемента. Второй - инерционный, обусловлен влиянием напряжения с выхода инерционного преобразования на крутизну нелинейного усилителя.

Теоретически динамика системы (1) была детально изучена в [7, 8]. Проведенное исследование системы с инерционностью с 1,5 степенями свободы в отсутствие падающего участка динамической характеристики нелинейного усилителя показали, что развитой хаотизации колебаний может предшествовать как последовательность бифуркаций удвоения с постоянной Фейгенбаума, так и бифуркации в соответствии с законом натурального ряда где устойчивые движения системы перемежаются зонами хаоса и последовательность бифуркационных значений параметра инерционности подчиняется закону подобия со значением константы подобия $\gamma = 3,72$. Механизм перехода к хаосу определяется в наибольшей степени параметром возбуждения m_1 .

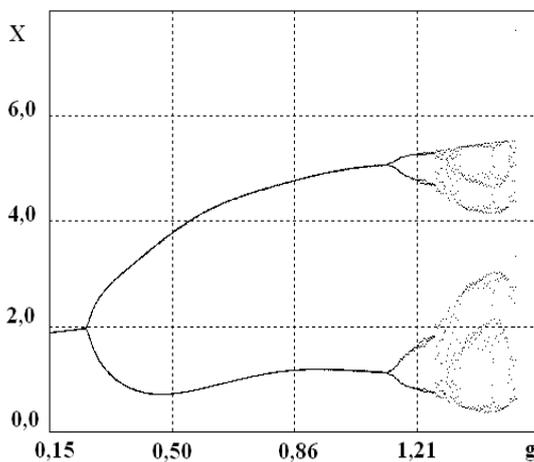


Рис. 1.

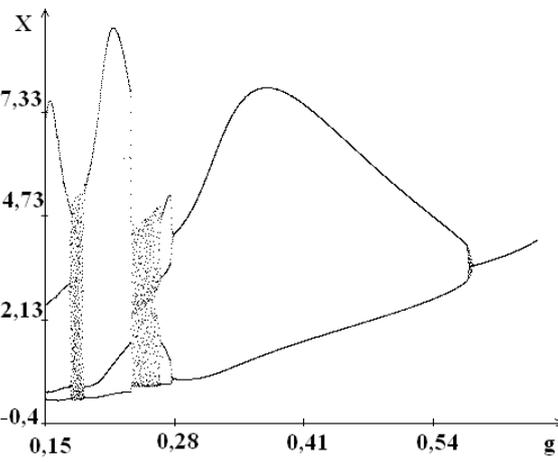


Рис. 2.

На рис.1. и рис. 2 представлены фрагменты бифуркационных диаграмм системы (1) при различных значениях определяющих параметров. Рис. 1 соответствуют значения параметров $m_1 = 1,4; m_2 = 0,2; q = 0,3;$, рис. 2 - $m_1 = 1,7; m_2 = 0,17; q = 0,05;$. Параметр инерционности g является бифуркационным параметром в обоих случаях. Из рис. 1 видно, что при $m = 1,4$ развитые хаотические колебания наблюдаются в системе при $g \geq 1,24$. Для рис.2 развитый хаос имеет место при малых значениях инерционности: $g \leq 0,07$. Это означает, что на практике режим генерации хаотических колебаний в одностранзисторных системах при коэффициентах усиления вблизи границы самовозбуждения можно наблюдать у верхней граничной частоты активных элементов.

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 $-1,4\text{В} < U_{\text{об}} < -0,7\text{В}$ 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

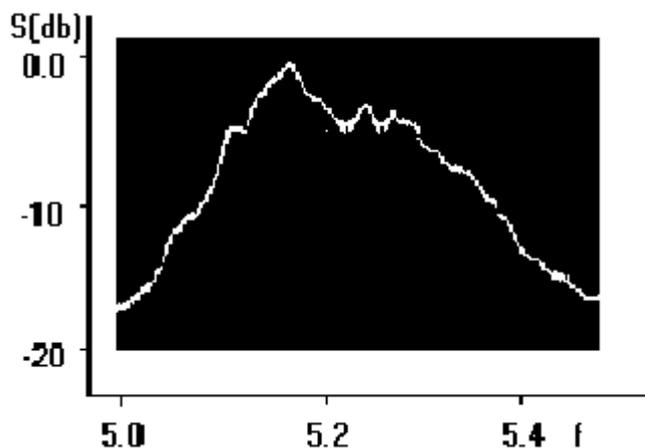


Рис. 3.

можно наблюдать при работе транзистора в сильно перенапряженном режиме. Так на рис. 3 приведен спектр хаотических колебаний регенеративного усилительного каскада СВЧ в генераторном режиме при $U_{\text{кб}} = 4,2\text{В}, U_{\text{об}} = 1,35\text{В}$.

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 1 – 2% от мощности сигнала системы в случае регулярного сигнала. Спектр колебательного процесса регенеративного усилительного каскада имеет ширину более 20% из-за малой добротности системы. Общий КПД системы не велик и составляет порядка единицы процента.

При больших токах активных элементов ситуация иная. Импедансы транзистора, равно как и коэффициент усиления регенеративного каскада резко зависит от тока. Особенно сильна эта зависимость в режиме близком к насыщению. Вблизи участка насыщения коэффициент усиления каскада быстро падает с максимального, равного 5-10 дБ для современных мощных транзисторов СВЧ, до единицы и менее при превышении сигнала на входе усилительного каскада на 3-5 дБ относительно номинального. Динамическая характеристика в этом случае имеет линейный участок и участок с насыщением. При максимальных токах, когда коллекторный переход открыт, токи полностью согласованного транзистора СВЧ в первом приближении определяются напряжениями питания. В этом случае основной вклад в инерционность вносит заряд неосновных носителей, накапливаемый в высокоомном коллекторном слое. В этом случае регенеративный усилительный каскад можно представить системой нелинейных дифференциальных уравнений с 2 степенями свободы:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= Y + (m_1 - m_2)X - XZ, & X \leq q, \\
 \dot{X} &= Y - m_2X - qZ, & X > q, \\
 \dot{Y} &= -X, \\
 \dot{Z} &= -gZ + gF(2X - m_2W)(2X - m_2W)^2, \\
 \dot{W} &= X - m_2W,
 \end{aligned} \tag{2}$$

переменные и параметры те же, что и в (1), только W – безразмерное напряжение на входе однополупериодного квадратичного детектора.

Система исследовалась в [1, 2, 4, 7, 8]. Исследования показали, что в динамике система демонстрирует бифуркации в виде натурального ряда при адиабатическом движении по параметру инерционности. Система бифуркаций обладает вложенной структурой не одного порядка со значением закона подобия $\gamma = 3,72$. Развитые хаотические колебания наблюдаются при малых значениях параметра инерционности. Это значит, что в реальных системах хаотические колебания будут иметь место при значениях определяющих параметров режиму насыщения активного элемента.

Экспериментальный макет генератора представлял собой регенеративный усилитель сантиметрового диапазона длин волн, переходящий в автогенераторный режим за счет изменения коэффициента усиления путем варьирования значений напряжений питания. Так же как и в случае малых токов, он был собран по планарной микрополосковой технологии на базе транзистора 2Т 982 А-2 включенного по схеме с общей базой. Однако согласование активного элемента по входу и выходу была выполнена в соответствии с сильноточным режимом транзистора.

На рис. 4 с помощью последовательных спектрограмм представлен фрагмент изменения в динамике генератора при переходе её от регулярных колебаний к хаотическим при изменении напряжения на коллекторе транзистора. Последовательность приведённых спектров сигнала генератора демонстрирует увеличение на единицу числа спектральных составляющих, рис. 4, а – рис. 4, д, и затем хаотические колебания, рис. 4, е. Эффективная ширина полосы генерируемых шумовых

колебаний порядка 10%, КПД – около 5%. Такая динамика исследуемого СВЧ макета генератора полностью согласуется с численным экспериментом в модели (2).

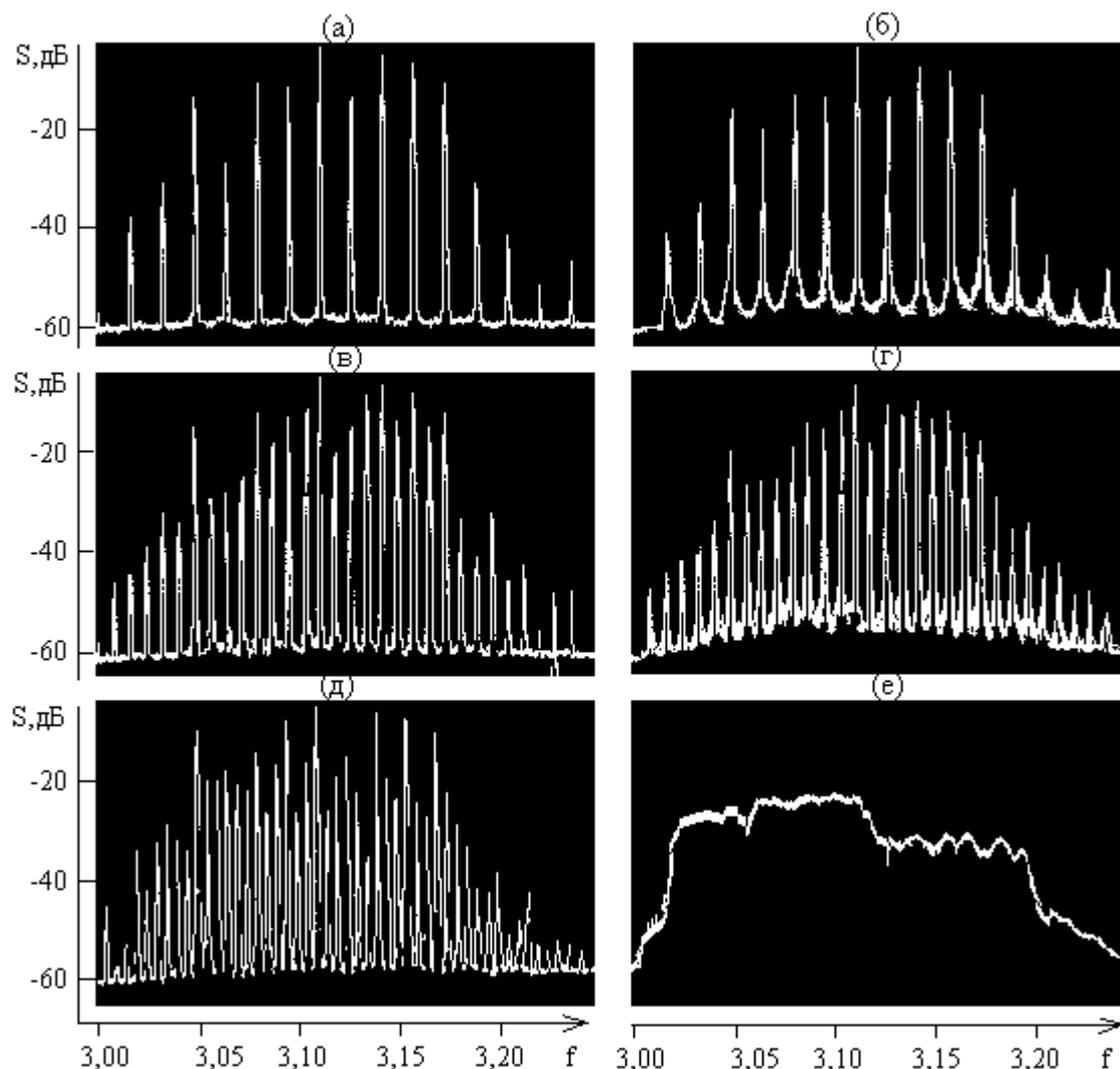


Рис. 4.

Сравнительный анализ моделей и экспериментальных регенеративных усилительных каскадов позволил установить взаимно однозначное соответствие значений определяющих параметров и существование регулярной и хаотической динамики системы. Качественное соответствие результатов, полученных в численных и экспериментальных исследованиях, с необходимостью указывает на применимость динамической модели при исследовании динамики в автономных и неавтономных системах на биполярных СВЧ транзисторах.

В отличие от системы (1) спектральные характеристики регенеративных усилительных каскадов при больших токах в соответствии с системой (2) имеет меньшую ширину спектра, обычно определяемую шириной спектра самого усилительного каскада, но более высокий КПД. Развитый хаотический спектр наблюдается при малых значениях параметра инерционности, что соответствует режимам, близким к граничной частоте и высоким рабочим токам активных элементов.

Таким образом, рассмотренные системы (1) и (2) в достаточно полной мере могут быть применены для описания и построения хаотических генераторов на основе уже разработанных регенеративных усилителей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-07-00298).

Литература

1. Савельев С.В. Генерация хаотических широкополосных колебаний в системах на биполярных транзисторах. // 58 Научная сессия, посвященная дню радио. 14-15 мая 2003 года, г. Москва. Труды конференции. Т. 2. С. 9 – 11.
2. Савельев С.В. // РЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850 – 858.
3. Савельев С.В. // Электронная техника. Сер. СВЧ – техника. Вып. 2. 2004. С. 20-30.
4. Максимов Н.А., Панас А.И., Савельев С.В. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Савельев С.В. Генерация хаотических колебаний в диапазоне сверхвысоких частот на основе транзисторных регенеративных усилительных систем. // 3 Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». Россия, Москва, 26 – 30 октября 2009 . Труды конференции. С. 138 – 140.
8. Савельев С.В. Однотранзисторный генератор хаоса сверхвысоких частот. // 3 Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». Россия, Москва, 26 – 30 октября 2009 . Труды конференции. С. 140 - 142.