

## ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.

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

*Предложена методика построения источников шумовых колебаний в диапазоне сверхвысоких частот на основе регенеративных усилительных каскадов для широкополосных систем передачи информации. Установлено взаимоднозначное соответствие между параметрами получаемых генерируемых колебаний и режимами активных элементов регенеративных систем.*

Развитие полупроводниковой элементной базы и продвижение их частотных и мощностных характеристик вверх позволяет в настоящее время создавать прямошумовые транзисторные генераторы хаотических колебаний, создающие конкуренцию системам со схемой генератор-усилитель по спектральным и мощностным характеристикам и превосходящие последних по энергетике и надежности. Преимущества полупроводниковых систем позволяет им занимать лидирующее место в системах передачи и обработки информации на основе динамического хаоса. Наиболее передовыми по энергетическим характеристикам во всем используемом диапазоне длин волн являются системы, построенные на биполярных транзисторах СВЧ [1 - 7].

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.

В общем виде однотранзисторный 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 однотранзисторный регенеративный усилитель описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений с 1,5 степенями свободы с входной 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  $F(X)$  - 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 [2, 6]. Проведенное исследование системы с инерционностью с 1,5 степенями свободы в отсутствие падающего участка динамической характеристики нелинейного усилителя показали, что развитой хаотизации колебаний в исследуемой системе предшествует последовательность бифуркаций в соответствии с законом натурального ряда, при этом устойчивые движения системы перемежаются зонами хаоса. Последовательность бифуркационных значений параметра инерционности подчиняется закону подобия со значением константы подобия  $\gamma = 3,72$ . Механизм хаотизации колебаний связан с потерей устойчивости системы вблизи петли седло – фокуса. При этом наиболее широкая зона развитых хаотических колебаний имеет место при малых значениях параметра инерционности за точкой сгущения значений бифуркационного параметра.

С практической точки зрения это значит, что в реальных системах режим развитых хаотических колебаний с наиболее вероятностью может наблюдаться вблизи верхней граничной частоты активных элементов регенеративных систем. 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, 3 – 4, 5, 7]. Исследования показали, что в динамике системы преобладают бифуркации в виде натурального ряда при адиабатическом движении по

параметру инерционности. Система бифуркаций обладает вложенной структурой не одного порядка со значением закона подобия  $\gamma = 3,72$ , аналогичным системе (1).

Сравнительный анализ модели и экспериментального регенеративного усилительного каскада 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 большой мощности.

В отличие от системы (1) спектральные характеристики регенеративных усилительных каскадов при больших токах имеет меньшую ширину спектра, обычно определяемую шириной спектра самого усилительного каскада, но более высокий КПД из-за большой выходной мощности генерируемого сигнала. Развитый хаотический спектр наблюдается при наименьших параметрах 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. Н.А. Максимов, С.В. Савельев. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. № 17. С. 72 – 77.
3. Савельев С.В. // РЭ. 2004. Т. 49. № 7. С. 850 – 858.
4. Савельев С.В. // Электронная техника. Сер. СВЧ – техника. Вып. 2. 2004. С. 20-30.
5. 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.
6. 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. // 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. June 30 – July 2. 2004. Moscow, Russia.
7. 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.