

Метод построения генераторов хаоса

С.В. Савельев

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.

В работе предложен метод построения генераторов хаотических колебаний на основе инерционной модуляции напряжений питания активных элементов. Даны теоретические предпосылки такого метода. Построены экспериментальные макеты генераторов хаоса на базе мощного отечественного транзистора 2Т982А-2 на основе инерционной модуляции напряжений питания. Представлены экспериментальные результаты исследования генерации хаотических колебаний в микроволновом диапазоне при работе транзистора в режиме больших и малых токов. Сделан вывод, что предложенный метод применим для систем на базе любых активных элементов.

In the work of the proposed methodology of chaotic oscillations based on generators inertia voltage modulation of active elements. Given the theoretical premise such techniques. Built experimental chaos generators based on powerful transistor 2T 982 A-2. Experimental results are presented a study of generation of chaotic oscillations in a microwave range for mode of large and small currents. It is concluded that the proposed methodology is applicable for any active elements.

Построение генераторов шума на базе мощных транзисторов практически не описывается научной в литературе из-за специфики работы самих активных элементов, параметры которых не являются постоянными величинами, а сильно зависят от рабочих токов. Причем эта зависимость не повторяется при переходе от одного активного элемента к другому, что не позволяет ввести параметры мощных транзисторов в библиотеки программ для расчета полупроводниковых структур и радиофизических схем, а значит, в ресурсах программ моделирования систем радиофизики отсутствует возможность создания генераторов шума на базе мощных активных элементов.

В [1] сделана первая попытка построить математическую модель генератора шума на базе мощного транзистора, не используя зависимые от рабочего тока параметры самого активного элемента. Такая математическая модель представляет собой генератор с выделенной инерционностью, когда инерционность системы определяется выходным током активного элемента, [2, 3]. В численном эксперименте были найдены значения параметров модели, отвечающие развитому хаосу с нормальным дифференциальным законом распределения плотности вероятности колебательного процесса. Показано, что развитые хаотические колебания в системе имеют место при значении параметра инерционности $g < 0,06$. Построен мощный экспериментальный генератор хаотических колебаний в микроволновом диапазоне на базе отечественного транзистора 2Т982А-2.

Однако, для достижения расчетных параметров математической модели, когда генератор находится в зоне развитого хаоса, активный элемент, транзистор, должен работать в сильно нелинейном режиме, что резко снижает энергетические характеристики опытных макетов. В настоящей работе предложен другой подход к созданию генераторов хаотических колебаний на базе мощных активных элементов.

Для примера рассмотрим генератор на мощном биполярном транзисторе. Простейший генератор представляет собой усилительный каскад СВЧ диапазона, где транзистор согласован по входу и выходу без каких-либо дополнительных схемных

построений. Необходимое значение положительной обратной связи для перехода в режим автогенерации осуществляется через внутренние межвыводные емкости транзистора. На практике усилительный каскад переводится в автоколебательный режим по достижении необходимых значений напряжений питания.

Для моделирования процессов, происходящих в описываемой системе используем модель генератора с выделенной инерционностью, которая, как это было показано ранее в [1-3], хорошо описывает процессы в системах на биполярных транзисторах.

Для нас основополагающим моментом в такой системе является факт зависимости крутизны (S) динамической характеристики активного элемента от напряжений питания. В первом приближении для транзистора можно записать:

$$S = r (U_0 - U_p), \quad (1)$$

где U_0 - постоянная составляющая напряжения питания,

U_p - переменная составляющая,

r - коэффициент.

Переменная составляющая может быть как внешним сигналом, так и сигналом, созданным специализированной цепью, входящей в состав системы. В случае, когда U_p - напряжение на выходе однополупериодного квадратичного детектора генератора с выделенной инерционностью и при правомерности условия:

$$r = \frac{b}{\omega_0^2 M}, \quad (2)$$

где b - параметр, определяющий глубину модуляции крутизны динамической характеристики,

ω_0 - круговая частота,

M - параметр определяющий величину положительной обратной связи, см. [1], для крутизны линейного участка динамической характеристики справедливо:

$$S = S_0 - \frac{b}{\omega_0^2 M} U_p, \quad (3)$$

Тогда для линейного участка характеристики для напряжения на входе нелинейного усилителя (Ψ) в системе генератора с выделенной инерционностью на линейном участке динамической характеристики $\Psi \leq k$, где k - предельное значение напряжения линейного участка, справедливо:

$$\ddot{\Psi} + \omega_0^2 \Psi = (\mu - b U_p) \dot{\Psi} - b \dot{U}_p \Psi, \quad (4)$$

где $\mu = \omega_0 M S_0 - R/L$.

Переходя к безразмерным переменным $\tau = \omega_0 t$, $X = \Psi(b/\omega_0)^{1/2}$, $Z = U_p b/\omega_0$, $Y = \Omega(b/\omega_0^3)^{1/2}$, где Ω - ток в цепи обратной связи генератора с выделенной инерционностью и учитывая, что $\dot{\Omega} = -\omega_0^2 \Psi$, уравнение (7) можно переписать как:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Y + (m_1 - m_2) X - ZX, \\ \dot{Y} &= -X, \end{aligned} \quad (5)$$

где $m_1 = M \omega_0 S_0$,

$m_2 = R(C/L)^{1/2}$ параметры возбуждения и диссипации соответственно.

Таким образом, полученные уравнения (5) полностью совпадают с результатами работы [1], что указывает на прямую возможность организации цепи инерционности с

необходимыми параметрами посредством модуляции значения напряжений питания активного элемента.

Далее, следуя [1], для участка с насыщением, $\Psi > k$, можно записать:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= Y - m_2 X - qZ, \\ \dot{Y} &= -X,\end{aligned}\tag{6}$$

где безразмерный параметр ограничения $q = k(b/\omega_0)^{1/2}$.

Связь между входным U и выходным U_P напряжениями однополупериодного детектора представима как:

$$\dot{U}_P = -gU_P + gF(U)U^2, \quad F(U) = \begin{cases} 1, & U \geq 0, \\ 0, & U < 0, \end{cases}\tag{7}$$

где $F(U)$ единичная функция Хевисайда. Для напряжения U справедливо

$$U = L_1 \dot{\Omega} - M \dot{I},\tag{8}$$

что после подстановки в (7) с учетом условий $W = I(b/\omega_0^3)^{1/2}$ и $L_1 = L = M$, позволяет записать:

$$\begin{aligned}\dot{Z} &= -gZ + gF(2X - m_2 W)(2X - m_2 W)^2, \\ \dot{W} &= X - m_2 W,\end{aligned}\tag{9}$$

где $g = RC/\tau_\phi$ – параметр инерционности,

$\tau_\phi = R_\phi C_\phi$ постоянная времени инерционного преобразователя.

Таким образом, используя (6, 7) и (9), уравнения, описывающие динамику генератора с инерционным преобразованием напряжения питания активного элемента, рассматриваемую систему можно представить в виде четырехмерной четырёхпараметрической нелинейной диссипативной системы:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= Y + (m_1 - m_2)X - XZ, & X \leq q, \\ \dot{X} &= Y - m_2 X - qZ, & X > q, \\ \dot{Y} &= -X, \\ \dot{Z} &= -gZ + gF(2X - m_2 W)(2X - m_2 W)^2, \\ \dot{W} &= X - m_2 W,\end{aligned}\tag{10}$$

Полученная система (10) совпадает с математической моделью генератора с выделенной инерционностью [1], описывающей динамику процессов в системе регенеративного усилителя на мощном биполярном транзисторе. Исходя из этого, для построения натуральных макетов на базе мощного транзистора 2Т982А02 будем исходить из основополагающего результата, полученного в работе [1], и указывающего на то, что системы (10) переходит в режим развитого хаоса с нормальным распределением дифференциального закона плотности вероятности колебательного процесса при значении параметра инерционности $g \leq 0,06$.

Используя возможность достижения параметра инерционности значений, указанных выше, за счет инерционной модуляции напряжения питания, построение генератора хаотических колебаний не представляет собой теперь особых сложностей. Необходимым условием генерации хаоса в системе регенеративного усилительного каскада является введение цепи однополупериодного инерционного преобразования выходного сигнала активного элемента и модуляции этим сигналом напряжений питания транзистора. При этом активный элемент работает в нормальном режиме, то есть напряжения питания близки паспортным значениям. Коэффициент усиления

транзистора при этом равен значению в режиме усиления. Выходная мощность хаотических колебаний близка мощности генерируемых регулярных колебаний.

На рис. 1 представлены спектры мощности генерируемых колебаний однотранзисторных систем с инерционным преобразованием напряжений питания активного элемента на базе транзистора 2Т982А-2 для режима большой мощности, рис. 1, а, и режима малой мощности, рис. 1, б, когда транзистор работает в режиме малых токов.

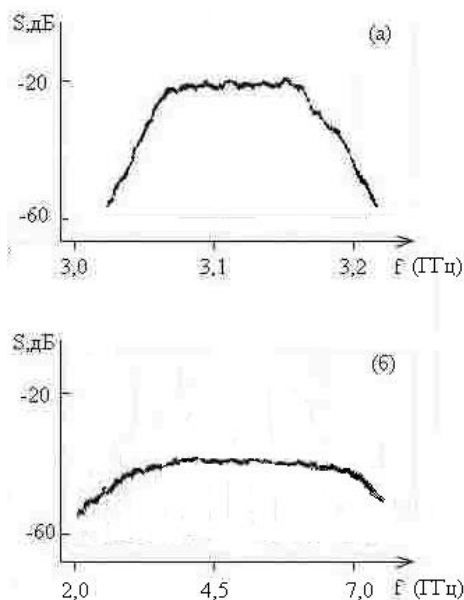


Рис. 1. Спектры мощности генераторов хаотических колебаний с инерционным преобразованием напряжений питания на базе транзистора 2Т982А-2 в случае работы активного элемента в режиме больших токов (а), и в случае малых токов (б).

Как видно из рисунка, колебания генератора в режиме больших токов занимают спектральный диапазон равный по порядку величины 10%. То есть генерация хаотических колебаний происходит в полосе частот усиления регенеративного усилительного каскада, на базе которого построен генератор хаотических колебаний. Интегральная мощность генератора составляла 1,2 Вт при КПД = 40%.

В случае малых токов рис. 1, б, эффективная полоса генерируемых колебаний составляла 3,5 октавы. Интегральная мощность хаотических колебаний 5,3 мВт, КПД = 7%.

Таким образом, теоретически и на практике представлен метод построения генераторов хаотических колебаний путем инерционной модуляции напряжений питания. Такой метод не имеет технологических ограничений и может быть применим в системах на базе любых активных элементов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-07-00956.

Литература

1. С.В.Савельев. Математическая модель мощного усилительного каскада на биполярном транзисторе. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/10/text.pdf>
2. Савельев С.Н., Морозова Л.А., Савельев С.В. «Моделирование систем на мощных биполярных транзисторах». // 12 Всероссийская конференция молодых ученых

«Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 5 – 7 сентября 2017 г., Саратов, Россия. Труды конференции.

3. С.В. Савельев Генерация сложных, в том числе хаотических колебаний в твердотельных системах. // Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 2017. 27.06 – 29.06.2017 г. Труды конференции.