

УДК 621.391

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-259-4-31-36

ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

С.В. Савельев, Л.А. Морозова

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук
141190, Фрязино, пл. Введенского, 1*

Предложена оригинальная схема построения мощного однотранзисторного генератора шумоподобных колебаний микроволнового диапазона длин волн. Генератор содержит инерционный преобразователь выходного сигнала нелинейного усилителя с положительной обратной связью, сигналом которого модулируется напряжение питания активного элемента (транзистора). Создан экспериментальный макет генератора хаотического сигнала на базе мощного отечественного транзистора 2Т982А-2. Цель инерционного преобразователя, содержала диод производящий однополупериодное преобразование части выходного сигнала генератора и RC – цепь с постоянной времени равное 0,05 от времени характерной длительности единичного колебания на центральной частоте генератора. Сигнал с выхода инерционного преобразователя подавался на эмиттерную цепь питания транзистора. Модуляция напряжения питания приводила к тому, что выходной сигнал генератора представлял собой последовательность неповторяющихся цугов колебаний со случайной длительностью и случайной начальной фазой. Полоса частот генерируемых шумовых колебаний при неравномерности спектра мощности 4 дБ занимала диапазон частот от 3,1 до 3,3 ГГц при интегральной мощности 1,2 Вт с усреднённой спектральной плотностью шумовых колебаний $6 \cdot 10^{-3}$ Вт/МГц. КПД генератора 15%.

Ключевые слова: *мощный биполярный транзистор, хаос, генератор с выделенной инерционностью*

Сведения об авторах: *Савельев Сергей Владимирович, ЧНС; Морозова Людмила Аркадьевна, mila-morozova.ludmila@yandex.ru*

HIGH POWER CHAOTIC OSCILLATOR

S. V. Savelyev, L. A. Morozova

*The Institute of Radioengineering and Electronics of Russian Academy of Sciences
141190, Moscow region, Fryazino, Vvedensky sq., 1*

The article presents a novel design of a microwave chaotic oscillator. The oscillator contains an inertial converter for the nonlinear amplifier output signal that modulates the supply voltage of the transistor. When the inertia of the converter becomes less than 0.06, the oscillator demonstrates chaotic behavior. We present an experimental model of a chaotic oscillator based on a high power transistor 2T982A-2. The inertial converter circuit contains a diode that perform half-wave conversion of a part of the output signal and a RC circuit with a time constant equal to 0.05 of the duration of an oscillation at the central frequency of the oscillator. The output signal of the inertial converter has been applied to the emitter power supply circuit of the transistor. Modulation of the supply voltage caused the output signal of the oscillator to become a sequence of non-repeating oscillation trains with a random duration and initial phase. The frequency band of the generated chaos with an uneven power spectrum of 4 dB was in a range from 3.1 to 3.3 GHz with an integrated power of 1.2 W. The averaged spectral density of noise oscillations was $6 \cdot 10^{-3}$ W / MHz. Efficiency of the oscillator was 15%.

Keywords: *power bipolar transistor, chaos, oscillator with inertia*

Data on authors: *Savelyev Sergey Vladimirovich, senior researcher; Morozova Luydmila Arkadyevna, mila-morozova.ludmila@yandex.ru*

Введение

Построение прямошумовых генераторов шума микроволнового диапазона на базе мощных транзисторов практически не описывается в научной литературе из-за специфики работы самих активных элементов, значения параметров которых не являются постоянными величинами, а имеют линейную в первом приближении зависимость от рабочих токов. Эта зависимость не повторяется при переходе от одного активного элемента к другому, что не позволяет ввести точные значения параметров 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] предложена математическая модель генератора на базе мощного транзистора не используя зависимые от рабочего тока значения параметров активного элемента. В численном эксперименте были найдены значения параметров модели, отвечающие развитому хаосу с нормальным дифференциальным законом распределения плотности вероятности колебательного процесса. Построен генератор хаотических колебаний в микроволновом диапазоне. Однако, для достижения расчетных параметров модели в хаотическом режиме, активному элементу необходимо работать в сильно нелинейном режиме, что резко снижает энергетические характеристики экспериментальных макетов, как это было показано ранее в [2], где генератор хаоса микроволнового диапазона, созданный на основе регенеративного усилительного каскада на мощном отечественном транзисторе 2Т982 А-2, характеризовался 3,4 %

полосой с центральной частотой 5,35 ГГц, интегральной мощностью 230 мВт, неравномерностью огибающей спектра мощности не более 3 дБ и КПД 10%. В [3] приводятся данные о создании генератора хаоса на том же типе транзистора, но содержащего дополнительный нелинейный контур с варакторным диодом для расширения полосы частот хаотического СВЧ-сигнала до 10 % и увеличение КПД генератора до 20 %. При этом интегральная мощность хаотического СВЧ-сигнала достигала уровня 600 мВт. Интересна методика построения мощных генераторов хаоса микроволнового диапазона с использованием спин-волновой линии передачи в качестве нелинейного элемента в кольцевой автоколебательной системе [4], где хаотическая динамика автоколебательной системы определялась параметрической неустойчивостью магнитостатических волн, а усилитель служил для компенсации потерь в кольце. Однако практическое применение генераторов такого типа ограничено из-за значительной неравномерности спектра мощности выходного сигнала составляющей 15дБ, при интегральной мощности 637 мВт в полосе частот 943 МГц с центральной частотой 2,95 ГГц при КПД 7%.

В настоящей работе предложен оригинальный подход по созданию генератора хаотических колебаний микроволнового диапазона на базе мощного транзистора путём практической реализации генератора с выделенной инерционностью. Для этого введены внешняя инерционная цепь производящая инерционные преобразования выходного сигнала с модуляцией сигнала с выхода инерционного преобразователя эмиттерного напряжения питания транзистора. При этом активный элемент работал в штатном режиме при паспорт-

ных значениях напряжений питания, что позволяло получать на выходе хаотические сигналы с высокими энергетическими показателями.

Основная часть

Генератор с выделенной инерционностью, впервые введённый в [5], хорошо описывает динамику одностранзисторных генераторов на мощных биполярных транзисторах, как это было показано, например, в [6]. Установлено соответствие значений параметров модели параметрам реального устройства. Численно исследована динамика модели в автоколебательном режиме с целью выявления закономерностей возникновения и развития регулярных и хаотических колебаний. Показано, что генератор с выделенной инерционностью переходит в зону развитых хаотических колебаний с близким к нормальному дифференциальным законом распределения плотности вероятности колебаний, при значениях параметра инерционности системы менее 0,06. Рассмотрена возможность построения генераторов шумоподобных колебаний на основе регенеративных усилительных каска-

дов. Отличительная особенность мощных транзисторных регенеративных усилительных каскадов СВЧ состоит в том, что основной режим работы транзисторов в них близок к насыщению, что при условии работы вблизи верхней граничной частоты делает существенным значение инерционности. При переходе транзистора в сильно перенапряженный режим при максимальных токах и пониженных по сравнению с паспортными значениями коллекторных напряжениях инерционность транзистора возрастает, что делает возможным переход системы в режим генерации хаотических колебаний. Однако, из-за пониженных коллекторных напряжений интегральная мощность хаотического сигнала обычно примерно на порядок ниже мощности сигнала генерируемых регулярных колебаний.

С целью повышения энергетики, в настоящей работе для реализации одностранзисторного генератора хаотических колебаний микроволнового диапазона предложено ввести внешнюю цепь инерционного преобразователя выходного сигнала. Микрополосковая топология такого генератора хаоса представлена на рис. 1.

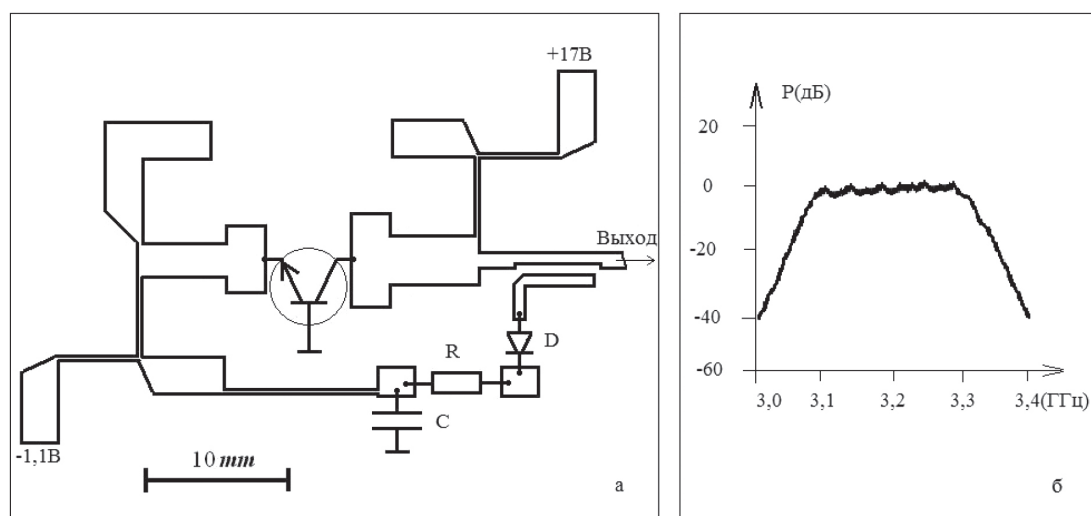


Рис. 1
Генератор хаоса: топология (а); спектр мощности (б)

Генератор представляет собой однотранзисторную систему построенную на базе мощного транзистора 2Т982А-2 включенного по схеме с общей базой и собранную по микрополосковой технологии на материале ФЛАН-10 толщиной 1 мм. Транзистор согласован по входу и выходу, вид согласующих элементов эмиттерной и коллекторной цепей представлены на рисунке. Положительная обратная связь в системе организовывалась за счет внутренних емкостей транзистора. Генератор переходил в режим автогенерации при достижении напряжения на эмиттере $-0,8$ В. В экспериментальном макете напряжения питания составляли на эмиттере $-1,1$ В и $+17$ В на коллекторе. Основная часть мощности хаотического сигнала с выхода генератора поступала в нагрузку. Двадцать процентов мощности ответвлялась в цепь однополупериодного квадратичного детектора включавшего в себя диод D типа Д403В, производивший однополупериодное преобразование сигнала, и RC фильтр

с параметрами, удовлетворяющему условию $g = (fRC)^{-1} = 0,05$, где f – центральная частота генератора. Значения элементов фильтра были следующие: $R = 300$ Ом, $C = 250$ pF. Напряжение с выхода инерционного преобразователя подавалось на четвертьволновой шлейф цепи питания эмиттера. При подаче напряжений питания происходило автовозбуждение колебаний в генераторе. При этом начинался рост положительного напряжения на выходе однополупериодного нелинейного преобразователя. Когда результирующее напряжение на эмиттере становилось более $-0,8$ В, процесс генерации обрывался. Таким образом, сигнал на выходе генератора представлял собой последовательность неповторяющихся цугов колебаний с произвольным числом единичных колебаний и случайной начальной фазой.

Спектр мощности выходного сигнала генератора хаоса представлен на рис. 1 б. Эффективная полоса частот генерируемых шумовых колебаний при неравномерности

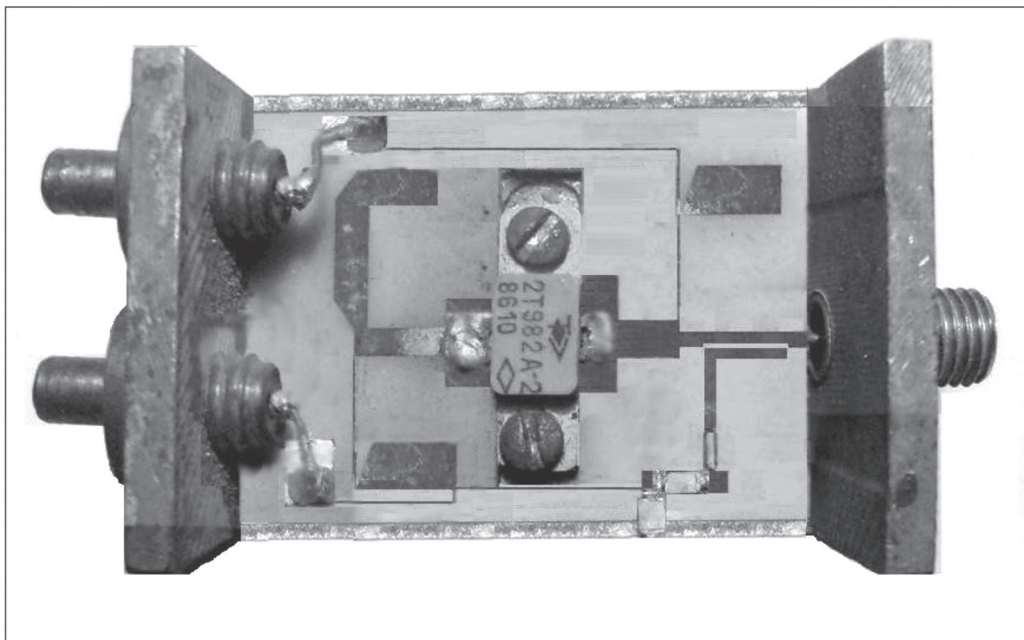


Рис. 2

Экспериментальный макет генератора хаоса

Таблица

Основные характеристики микроволнового генератора хаотических колебаний

Название параметров (единицы измерения)	Значения параметров
Габаритные размеры (мм)	45x32x19
Вес (г)	50
Напряжения питания (В)	+17; -1,1
Потребляемый ток (мА)	400
КПД (%)	15
Эффективная полоса частот хаотических колебаний (ГГц)	3,1 – 3,3
Интегральная мощность на выходе (Вт)	1,2

спектра мощности 4 дБ занимала диапазон частот от 3,1 ГГц до 3,3 ГГц, интегральная мощность сигнала составляла 1,2 Вт, что для усреднённой спектрально плотности генерируемых шумовых колебаний давало значение $6 \cdot 10^{-3}$ Вт/МГц. КПД генератора при рабочем токе транзистора 400 мА равнялся 15%.

На рис. 2 представлена фотография экспериментального макета генератора хаотических колебаний. Экспериментальный макет изготовлен на шасси из алюминиевого сплава Д16 с последующим гальваническим покрытием цинком. Микрополосковая плата припаивалась на основании макета генератора припоем ПОСК 50-18. Транзистор 2Т982А-2 крепился к основанию шасси с помощью винтов М3. Диод, сопротивление и конденсатор припаивались к полосковым линиям в соответствии с представленной схемой на рисунке 1а.

Основные технические характеристики микроволнового генератора хаотических колебаний представлены в таблице.

Заключение

В статье предложен и реализован на практике генератор хаотических колебаний с выделенной инерционностью в микроволновом диапазоне длин волн на

базе отечественного мощного транзистора 2Т982 А-2. Генератор прост в исполнении и практически не требует настройки. Исследование изменений значений напряжений питания на генерацию хаотических колебаний показало, что значительное, до 25 %, уменьшение коллекторного напряжения питания не приводило к срыву хаотических колебаний, при этом уменьшалась, до 60%, интегральная мощность на выходе генератора. Режим генерации хаоса устойчив и к изменению температуры основания корпуса генератора, на которой крепится база транзистора в диапазоне от -30 до +60°C. Устойчивость к внешним воздействиям совместно с параметрами выходного хаотического сигнала генератора позволяет рекомендовать его для использования в аппаратах радиопротиводействия и активной шумовой радиолокации.

В заключение стоит отметить, что проведенные экспериментальные исследования транзисторного генератора с выделенной инерционностью микроволнового диапазона длин волн позволяют предложить его реализацию на других типах активных элементов с зависимостью крутизны динамической характеристики от напряжений питания.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Савельев С.В. 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.В. Генератор микроволновых хаотических колебаний на мощном биполярном транзисторе / С.В. Савельев // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – Вып. 11. – С. 20 – 25.
3. Дмитриев, А.С. и др. Генерация хаоса / А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Н.А. Максимов, А.И. Панас – М.: Техносфера, 2012. – 359 с.
4. Гришин, С.В. Сверхширокополосный спин-волновой генератор хаоса средней мощности на полевых транзисторах / С.В. Гришин, В.С. Гришин, Д.В. Романенко, Ю.П. Шараевский // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – Вып. 19. – С. 51 – 59.
5. Савельев, С.В. Бифуркационные явления с аддитивным увеличением периода колебаний в одномодовой радиофизической системе / С.В. Савельев // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37. – № 6. – С.1064 – 1071.
6. Савельев, С.В. Регулярная и хаотическая динамика генераторов сверхвысоких частот на биполярных транзисторах большой мощности / С.В. Савельев // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49. – № 7. – С. 850 – 858.
- nom tranzistore [Mathematical model of a bipolar transistor power amplifier stage]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*, 2017, no. 6, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jun17/10/text.pdf>
2. Savelyev S. V. Generator mikrovolnovykh khaoticheskikh kolebaniy na moshchnom bipolyarnom tranzistore [Microwave chaotic oscillator based on power bipolar transistor]. *Pis'ma v ZhTF*, 2012, vol. 38, iss. 11, pp. 20-25.
3. Dmitriev A. S. Efremova E. V., Maksimov N. A., Panas A. I., Generatsiya khaosa [Chaos generation]. Moscow, Tekhnosfera, 2012, 359 p.
4. Grishin S. V., Grishin V. S., Romanenko D. V., Sharaevskiy Yu. P. Sverkhshirokopolosnyy spin-volnovoy generator khaosa sredney moshchnosti na polevykh tranzistorakh [Ultra-wideband spin-wave medium-power chaos generator based on field effect transistors]. *Pis'ma v ZhTF*, 2014, vol. 40, iss. 19, pp. 51-59.
5. Savelyev S. V. Bifurkatsionnyye yavleniya s additivnym uvelicheniyem perioda kolebaniy v odnomodovoy radiofizicheskoy sisteme [Bifurcation phenomena with an additive increase in the oscillation period in a single-mode radio system]. *Radiotekhnika i elektronika*, 1992, vol. 37, no. 6, pp. 1064-1071.
6. Savelyev S. V. Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika generatorov sverkhvysokikh chastot na bipolarnykh tranzistorakh bol'shoy moshchnosti [Regular and chaotic dynamics of microwave oscillators based on high power bipolar transistors]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2004, vol. 49, no. 7, pp. 850-858.

References

1. Savelyev S. V., *Matematicheskaya model' moshchnogo usitel'nogo kaskada na bipolyar-*