

A. V. Demyanenko, I. V. Semernick, Yu. I. Alekseev  
Southern federal university (Taganrog)

### IMPATT oscillator's parameters analysis under operation with a matched load

*The results of self-oscillator based on the IMPATT diode equation solution under operation with a matched load are discussed. With a glance of impedance features of IMPATT diode the relationships that define amplitude and frequency of oscillations are given.*

Microwave oscillator, IMPATT diode, impedance features

Статья поступила в редакцию 12 сентября 2014 г.

---

УДК 621.382

И. В. Семерник, Ю. И. Алексеев, А. В. Демьяненко  
Южный федеральный университет (Таганрог)

## Исследование динамики развития хаотической генерации в детерминированной автоколебательной системе на лавинно-пролетном диоде<sup>1</sup>

*Обсуждаются теоретические и экспериментальные результаты исследования возможности получения хаотической генерации в детерминированной системе – автогенераторе на лавинно-пролетном диоде.*

### Динамический хаос, СВЧ-генератор, лавинно-пролетный диод, хаотические колебания

Динамический хаос в активных СВЧ-системах представляет значительный интерес и обладает большими потенциальными возможностями в сфере прикладных исследований и разработок. Источники хаотических колебаний создаются на основе различных нелинейных элементов. Однако в диапазоне частот выше нескольких гигагерц аналогов генераторам хаотических колебаний на основе СВЧ-диодов с отрицательным сопротивлением [1]–[5] пока не существует. Устройства на основе высокочастотных транзисторов и интегральных схем способны работать в частотном диапазоне вплоть до нескольких гигагерц, но выходная мощность таких приборов, как правило, мала, а КПД не превышает несколько процентов.

Хаотическая генерация в детерминированных автоколебательных системах в СВЧ-диапазоне на основе твердотельных активных элементов с отрицательным сопротивлением открывает возможность получения шумовых источников на основе достаточно простых конструктивных решений, с одной стороны, при высоких уровнях выходной мощности – с другой.

В настоящее время признано [2]–[4], что существенно более мощные шумовые источники получаются на основе автогенераторов на лавинно-пролетных диодах (ЛПД), переведенных специальными приемами в режим динамического хаоса. Это позволяет иметь шумовые генераторы, выходная мощность которых на 3–4 порядка превышает мощность генераторов шума, полученных традиционным путем [3]–[6]. Однако разработка подобных устройств требует наличия достоверной теоретической модели генератора хаотических колебаний на ЛПД, достаточно точно отображающей процессы, происходящие в анализируемой системе.

В настоящей статье на основе предложенной модели проведен численный анализ регенеративной автоколебательной системы – генератора на ЛПД, на выходе которого присутствует неоднородность, вызывающая появление в системе собственного сигнала с некоторой фазовой задержкой [7]. На основании разработанной модели выполнен и экспериментально исследован шумовой генератор, в котором стимулирование хаотической генерации осуществляется искусственным

---

<sup>1</sup> Результаты, изложенные в статье, получены в рамках выполнения гранта № 8.2461.2014/К.

рассогласованием генератора с нагрузкой [5]. Приведенные результаты исследования сопоставлены с численными решениями, полученными для диода 3A707B, работающего, согласно техническим условиям, в диапазоне частот 10.4...11.7 ГГц. Кристалл диода изготовлен из арсенида галлия, в связи с чем в работе использованы те же электрофизические параметры, что и в [8].

В реальной системе невозможно идеально согласовать генератор с нагрузкой. Некачественное согласование всегда приводит к появлению в системе отраженного сигнала с частотой, равной частоте генерации, но с некоторой фазовой задержкой. При наличии в системе отраженного сигнала систему уравнений, описывающую генератор, необходимо дополнить учитывающим его членом.

Перевод активной колебательной системы в режим генерации хаотических колебаний, как правило, состоит в усложнении самой колебательной системы генератора. Однако существует также возможность перевести систему в режим динамического хаоса без изменения ее структуры – введением дополнительного внешнего гармонического сигнала.

Таким образом, при использовании выражений для активной  $R_{p-n}(I_1, I_0)$  и реактивной  $X_{p-n}(I_1, I_0)$  частей импеданса ЛПД ( $I_1, I_0$  – амплитуда СВЧ-тока и ток питания ЛПД соответственно) система дифференциальных уравнений, составленная на основе эквивалентной схемы [8], [9] и учитывающая наличие собственного отраженного и внешнего сигналов, имеет вид

$$\begin{cases} di_1/dt = i_2; \\ di_2/dt = -\left[\frac{R_{p-n}(I_1, I_0) + R_H}{L}\right]i_2 - \\ -\left\{\omega_0^2 - \frac{\omega_0[X_{p-n}(I_1, I_0) - X_{C_{dr}}]}{L}\right\}i_1 + \\ + k\omega_0^2 i_1(t - \tau)\exp(-j\omega_0\tau) + \omega_0\omega_{BH}I_{BH}\cos\theta; \\ d\theta/dt = \omega_{BH}, \end{cases}$$

где  $i_1, I_1, i_2$  – СВЧ-ток, его амплитуда и производная соответственно;  $I_0$  – ток питания диода;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $L$  – индуктивность резонатора;  $\omega_0$  – резонансная частота колебательного контура генератора;  $X_{C_{dr}} = 0.4$  мкФ – емкость пролетной области диода;  $k$  – коэффициент отражения сигнала от неоднородности;  $\tau$  – задержка отраженного сигнала;  $\omega_{BH}, I_{BH}, \theta$  – круговая ча-

стота, амплитуда и фаза тока внешнего воздействия соответственно.

Сопротивление нагрузки равно 4.3 Ом. Примем индуктивность резонатора  $L = 8.95 \cdot 10^{-10}$  Гн, при этом частота генерации в детерминированном режиме попадает в диапазон рабочих частот используемого диода.

Решение системы дифференциальных уравнений проведено в пакете MATLAB встроенной функцией численного решения ОДУ `dde23`, позволяющей производить решение методом Рунге–Кутты 2–3-го порядка при наличии в системе уравнений функции, задержанной на постоянную величину. На каждом шаге численного решения оценивается локальная погрешность и выбирается оптимальный шаг. При этом существует возможность задать максимальный шаг численного решения. В данном случае он выбран равным 0.1 периода колебаний.

Вначале работа генератора исследована при отсутствии неоднородности в выходной линии и дополнительного внешнего сигнала, для чего во втором уравнении системы принято  $k = 0$  и  $i_{BH} = 0$ . Пусковой ток генератора при этом составил 54 мА. Поведение системы в детерминированном режиме при изменении параметров модели хорошо согласуется с теоретическими и экспериментальными данными, что подтверждает достоверность разработанной модели.

Анализ работы генератора в детерминированном режиме показал, что перевести исследуемую систему в другой режим работы только изменением тока питания ЛПД или индуктивности резонатора не представляется возможным. В этой связи исследуемая система переводилась в режим динамического хаоса упомянутым ранее способом: введением инерционной обратной связи за счет подключения несогласованной нагрузки, для чего в выходную линию генератора добавлялась неоднородность.

Таким образом, исследование динамики работы генератора проведено при наличии на входе системы собственного отраженного от неоднородности сигнала с некоторой фазовой задержкой. Ток питания ЛПД принят 90 мА, коэффициент отражения 0.1.

При небольшой задержке отраженного сигнала (менее 0.1 пс) наблюдается эффект самосинхронизации системы собственным отраженным сигналом, что подтверждается и экспериментальными исследованиями. Увеличение задержки приводит к нарушению синхронизации и появлению некоторой амплитудной нестабильности. Затем си-

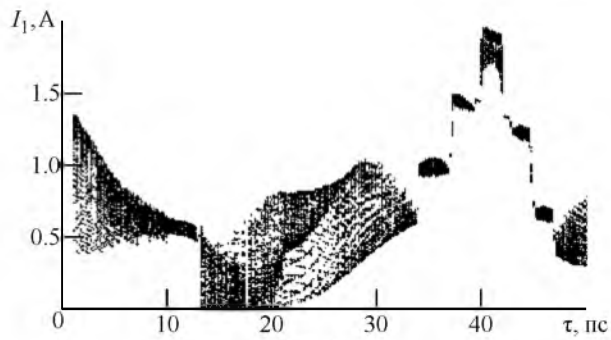


Рис. 1

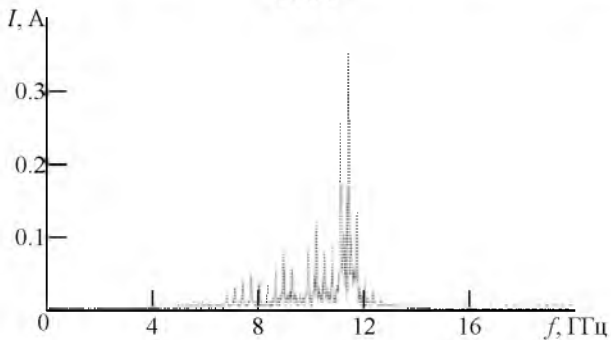


Рис. 2

система переходит в режим устойчивых многочастотных колебаний. При задержках порядка 1 пс дальнейших качественных изменений в поведении системы не происходит. Далее приведены результаты исследования работы системы при задержках, превышающих 1 пс.

На рис. 1 приведена бифуркационная диаграмма для случая  $I_0 = 90$  мА,  $k = 0.1$  при  $\tau$  от 1 до 50 пс.

При малых задержках (порядка нескольких пикосекунд) решением является квазигармонический процесс, спектральный состав которого при  $\tau = 2.78$  пс приведен на рис. 2.

Увеличение задержки отраженного сигнала приводит к тому, что устойчивое квазигармоническое колебание начинает прерываться участками нерегулярного движения, которые с увеличением  $\tau$  становятся длиннее и появляются чаще.

Дальнейшее увеличение задержки (более 13 пс) приводит к переходу системы в режим динамического хаоса. Результаты расчета спектра генери-

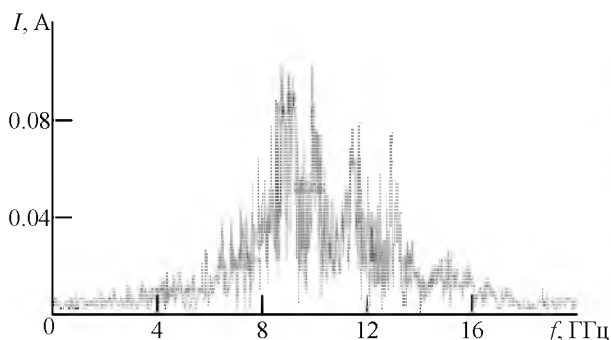


Рис. 3

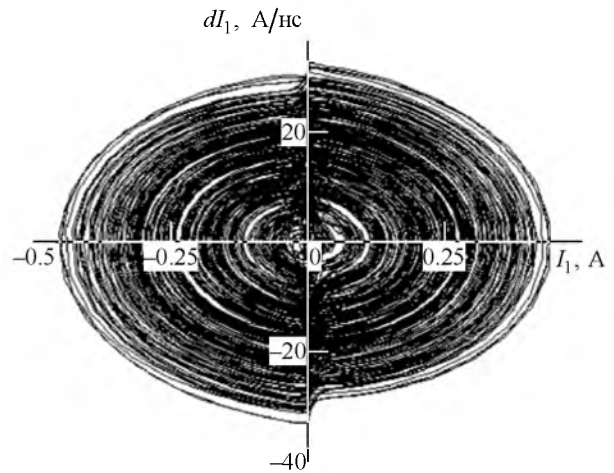


Рис. 4

руемого сигнала в режиме динамического хаоса при  $\tau = 14.3$  пс показаны на рис. 3. Фазовый портрет моделируемой системы в режиме генерации хаотических колебаний приведен на рис. 4.

На рис. 5 показана нормированная автокорреляционная функция хаотического процесса. Время корреляции составляет 0.1 нс. Вид автокорреляционной функции характерен для хаотического сигнала: быстрый спад корреляции и отсутствие боковых пиков.

На основании данных, представленных на рис. 3 и 4, можно утверждать, что при изменении задержки отраженного сигнала система переходит в режим динамического хаоса одним из самых распространенных способов – через перемежаемость регулярных и нерегулярных колебаний. При токе питания ЛПД 90 мА система переходит в режим генерации хаотических колебаний при задержках отраженного сигнала от 13 до 21 пс. Кроме того, область генерации хаотических колебаний наблюдается также и при задержках отраженного сигнала от 58 до 63 пс. Вне пределов указанных диапазонов задержек система находится в режиме многочастотной генерации. Кроме того, при задержках порядка 40 и 95 пс выходной сигнал генератора представляет собой гармоническое колебание с некоторой амплитудной не-

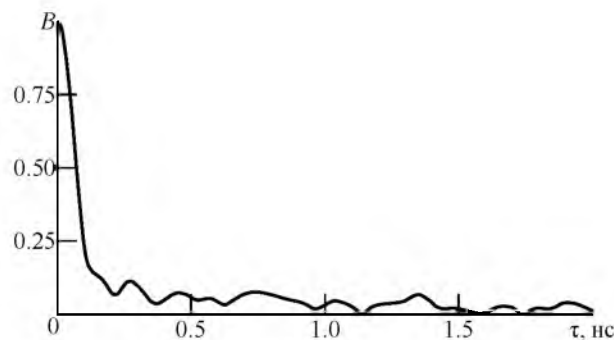


Рис. 5

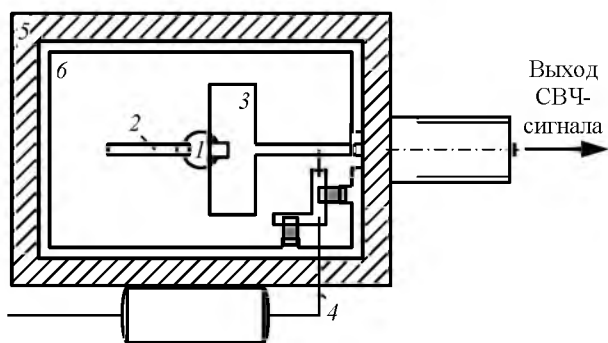


Рис. 6

стабильностью, при этом амплитуда колебаний выше, чем при отсутствии отраженного сигнала.

Исследование системы при изменении коэффициента отражения показывает, что его возрастание приводит к качественным изменениям, появляющимся при меньших задержках отраженного сигнала. Кроме того, при увеличении тока диода наблюдается сужение области хаотических колебаний в пространстве значений параметра  $k$ .

В подтверждение представленным результатам теоретического анализа и моделирования далее представлено экспериментальное исследование СВЧ-генератора хаотических колебаний, конструкция которого соответствует разработанной модели [7].

Эскиз конструкции исследуемого генератора показан на рис. 6: 1 – генераторный ЛПД; 2 – резонатор – полуволновый отрезок несимметричной микрополосковой линии, разомкнутый на конце; 3 – четвертьволновый трансформатор, осуществляющий импедансное согласование между диодом и выходной линией передачи; 4 – цепь питания ЛПД; 5 – корпус генератора; 6 – микросхема. На конце выходной передающей линии сделан разрыв шириной 0.1 мм, выполняющий одновременно функции блокировочного конденсатора и роль неоднородности, приводящей к рассогласованию и появлению отраженного сигнала.

Генератор запускался в детерминированном режиме в соответствии с требованиями для примененного типа ЛПД и поставлен в измерительный стенд для контроля его характеристик.

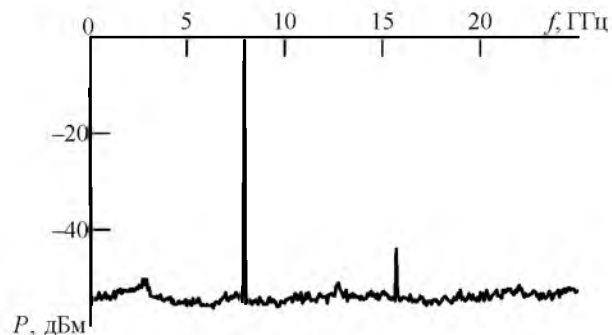


Рис. 7

На рис. 7 представлен спектр выходного сигнала генератора при токе питания 28 мА. В детерминированном режиме спектр содержит основное колебание на частоте 7.88 ГГц с выходной мощностью 0.63 дБм и вторую гармонику на частоте 15.7 ГГц с выходной мощностью –44 дБм.

Как указано ранее, в исследовании рассмотрено получение хаотической генерации воздействием на генерирующий диод собственным задержанным отраженным сигналом. Разрыв линии передачи на выходе генератора вызывает отраженный сигнал, характеризуемый определенным коэффициентом отражения, зависящим от ширины разрыва, а расстояние от диода до разрыва и диэлектрическая проницаемость подложки определяют фазовую задержку сигнала.

В работах [10], [11] показано, что наличие отраженного сигнала существенно влияет на динамику работы генератора. При этом частотный диапазон, в котором работает система, не столь важен. Известны результаты экспериментального наблюдения и численного моделирования низкочастотных, сверхвысокочастотных и оптических генераторных систем [10]–[12], демонстрирующих переход в хаотическое состояние при наличии на входе системы собственного задержанного отраженного сигнала. Такие системы можно рассматривать как системы с инерционной обратной связью.

Исследование динамики системы при регулировке тока питания ЛПД показывает, что при возрастании тока диода увеличивается мощность генерации [13], что приводит к увеличению мощности сигнала в цепи обратной связи при постоянном коэффициенте отражения. Увеличение тока питания ЛПД до уровня более 34 мА приводит к бифуркации удвоения периода, и в спектре появляются гармонические составляющие с частотами, кратными половине частоты основного колебания (рис. 8).

Дальнейшее увеличение тока диода приводит к последующим аналогичным бифуркациям. На рис. 9 показан спектр выходного сигнала генератора

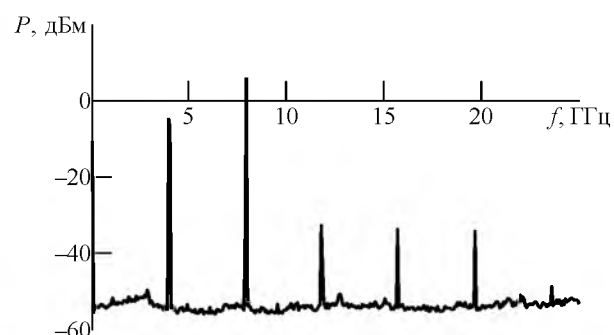


Рис. 8

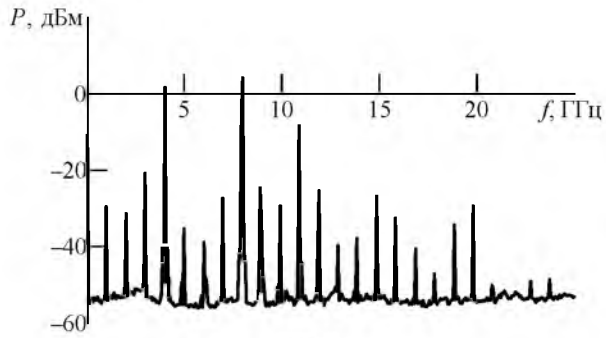


Рис. 9

ра при токе питания ЛПД 42 мА, на котором видны последующие бифуркации удвоения периода.

Наконец, увеличение тока питания ЛПД до 60 мА приводит к переходу системы в режим динамического хаоса (рис. 10). При этом наблюдается характерный для данного режима работы генератора сплошной шумовой спектр в диапазоне от 750 МГц до 15.5 ГГц со средним уровнем  $-50$  дБм и провалами в окрестности частот 3.3, 5.36 и 10.7 ГГц. Максимальный уровень спектральных составляющих достигает  $-20$  дБм. В спектре выходного сигнала также присутствуют гармонические составляющие на частотах 4 и 8 ГГц, мощность которых значительно превышает максимальный уровень шумового спектра, что увеличивает общую неравномерность шумовой генерации.

Автокорреляционная функция хаотического процесса, приведенного ранее, представлена на рис. 11.

Анализ показывает, что, как и при моделировании, автокорреляционная функция имеет вид, характерный для хаотического сигнала. Время корреляции составляет примерно 8.5 нс. Исследуемый процесс является шумовым процессом с достаточно равномерным спектром в широкой полосе частот. Интервал корреляции экспериментального хаотического сигнала несколько больше, чем при моделировании. Это может быть вызвано наличием двух спектральных составляющих на частотах основной гармоники и ее субгармоники, уровень которых существенно больше среднего

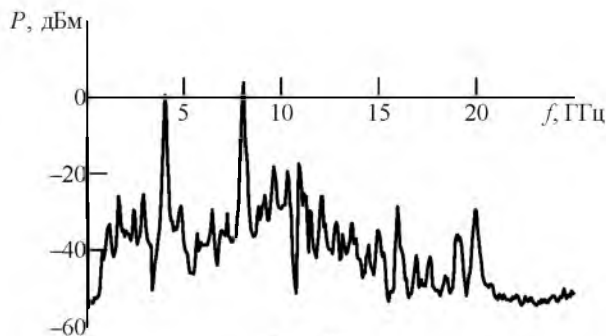


Рис. 10

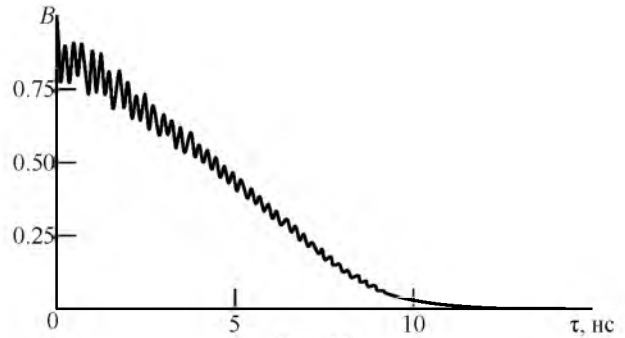


Рис. 11

уровня шумового спектра. При необходимости эти спектральные составляющие могут быть устранены фильтрацией.

Таким образом, при экспериментальном исследовании макета выявлено сильное влияние собственного задержанного отраженного сигнала на динамику и режимы работы генератора. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что исследуемая система переходит в режим динамического хаоса при увеличении мощности отраженного сигнала по классическому сценарию удвоения периода. Для проверки того, что влияние на динамику работы генератора оказывает именно неоднородность в выходной линии генератора, на место разрыва устанавливался разделительный конденсатор в стандартном корпусе 0402. При этом, как и ожидалось, бифуркаций удвоения периода и перехода системы в хаотический режим не возникало. В рассмотренном макете генератора нет возможности плавного изменения коэффициента отражения и фазы отраженного сигнала, поэтому возможность детального наблюдения развития динамики системы при плавном изменении параметров инерционной обратной связи отсутствует.

В эксперименте наблюдался переход к динамическому хаосу по сценарию удвоения периода, в то время как при моделировании выявлялся ярко выраженный жесткий переход, сопровождающийся явлением перемежаемости. В одной и той же системе при различных значениях управляющих параметров может наблюдаться переход к хаосу по различным сценариям, которые к тому же могут сложным образом комбинироваться. Возможно, подобная ситуация имеет место и в рассматриваемом случае. Имеющееся техническое оборудование не позволяет осуществлять плавную перестройку коэффициента отражения в экспериментальном макете, что может быть осуществлено с помощью тюнеров импеданса и является предметом дальнейшего исследования.

В экспериментальном исследовании коэффициент отражения имел значение около 0,7, в то время как при моделировании при таких значениях коэффициента отражения наблюдалось полное подавление генерации отраженным сигналом. Подобное явление может быть вызвано несоответствием поведения принятых и широко известных выражений для импеданса ЛПД [8], [9] при больших значениях амплитуды СВЧ-тока: согласно теоретическим предположкам с увеличением амплитуды первой гармоники СВЧ-тока активная часть импеданса асимптотически стремится к нулю, не меняя знак, в то время как на практике ЛПД имеет отрицательное сопротивление только в ограниченном диапазоне амплитуд. В связи с

этим необходима разработка физической модели диода, справедливой в широких диапазонах рабочих частот и мощностей.

Таким образом, теоретически и экспериментально показана возможность получения хаотической генерации в детерминированной регенеративной автоколебательной системе при рассогласовании генератора с нагрузкой. При этом время корреляции имеет весьма малое значение, а шумовой спектр занимает существенную полосу частот.

Разработанная модель может быть применена при теоретических исследованиях режимов работы генератора на ЛПД в присутствии собственного задержанного по фазе сигнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное исследование динамики развития режима хаотических колебаний в детерминированной автоколебательной СВЧ-системе / Ю. И. Алексеев, М. В. Орда-Жигулина, А. В. Демьяненко, И. В. Семерник // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 3. С. 74–77.
2. Экспериментальное исследование возбуждения шумовых колебаний в генераторах на лавинно-пролетных диодах / Р. В. Беляев, А. С. Жерновенков, Н. Н. Залогин, А. И. Мельников // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 12. С. 1484–1489.
3. Демьяненко А. В., Семерник И. В., Алексеев Ю. И. Экспериментальное исследование динамики развития хаотических колебаний в генераторе на лавинно-пролетном диоде в присутствии собственного отраженного сигнала // Нелинейный мир. 2014. Т. 12, № 1. С. 25–28.
4. Демьяненко А. В. Исследование шумовых параметров генератора на лавинно-пролетном диоде в режиме хаотической генерации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2012. Вып. 5. С. 110–113.
5. Семерник И. В., Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Исследование возможности возбуждения хаотических колебаний в генераторе на лавинно-пролетном диоде путем введения неоднородности в выходную линию передачи // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 337–339.
6. Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Широкополосный генератор шума на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 4. С. 74–77.
7. Семерник И. В., Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Модель для теоретического анализа режимов работы генератора на лавинно-пролетном диоде с учетом собственного отраженного сигнала // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 329–331.
8. Алексеев Ю., Демьяненко А. Детектирование оптических колебаний лавинно-пролетными диодами. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT acad. publishing GmbH & Co. KG, 2012. 108 с.
9. Тагер А. С., Вальд-Перлов В. М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1968. 480 с.
10. Sobhy M. I., Butcher N. A., Nasser A. A. A. Chaos in microwave systems // 27<sup>th</sup> Europ. microwave conf., Jerusalem, Israel, 8–12 Sept. 1997. Piscataway: IEEE, 1997. С. 1301–1308.
11. Hohl A., Gavrielides A. Experimental control of a chaotic semiconductor laser // Optics letters. 1998. Vol. 23, № 20. С. 1606–1608.
12. Генерация хаоса / под общ. ред. А. С. Дмитриева. М.: Техносфера, 2012. 424 с.
13. Алексеев Ю. И., Демьяненко А. В. Генератор на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 58–59.

I. V. Semernick, Yu. I. Alekseev, A. V. Demyanenko  
Southern federal university (Taganrog)

### Research of chaotic generation progress dynamic in deterministic self-oscillating system based on the IMPATT diode

*Theoretic and experimental research results of the possibility of obtaining the chaotic generation in the deterministic system – self-oscillator based on the IMPATT diode are discussed.*

Dynamic chaos, microwave oscillator, IMPATT diode, chaotic oscillations

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2013 г.