ЕВГЕНИЙ МЯСИН, ВИКТОР КОТОВ, ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
eam168@ms.ire.rssi.ru

ГЕНЕРАЦИЯ ШУМА В ОДНОЧАСТОТНОМ ЛПД-ГЕНЕРАТОРЕ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ

Экспериментально исследовано изменение спектра одночастотных колебаний генератора на ЛПД (ГЛПД) 7-мм диапазона волн и сигнала с выхода амплитудного детектора под воздействием гармонического низкочастотного колебания (3 МГц) на цепь питания ЛПД. Показано, что увеличение амплитуды низкочастотного колебания при положении рабочей точки на ВАХ диода как вблизи пускового тока, так и ниже его, приводит к генерации шума в ГЛПД и изменению формы гармонической амплитудной модуляции воздействия.

К настоящему времени исследовано множество самых разнообразных автоколебательных систем, демонстрирующих хаотическую динамику. Во второй половине прошлого века это были автоколебательные системы на основе электровакуумных приборов — например, ЛБВ [1, 2]. С развитием твердотельной СВЧ-электроники оказалось возможным создавать такие системы на основе транзисторов, даже с большей шириной спектра, чем в ЛБВ [3]. Однако в миллиметровом диапазоне в твердотельных генераторах приходится использовать лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и диоды Ганна, а для реализации в них режима хаотических колебаний, например в ГЛПД, применять многорезонансные волноводно-коаксиальные камеры [4, 5]. Исследовались и другие методы для реализации режимов шумовой генерации в ГЛПД. В работе [6] показана возможность хаотизации колебаний за счет воздействия внешнего гармонического сигнала частотой 0,150 и 1 МГц на цепь питания такого ГЛПД. В данном случае воздействие низкочастотного (НЧ) сигнала происходит непосредственно на электронный поток, который возбуждает высокочастотную (ВЧ) автоколебательную систему генератора. Однако в первом случае в нелинейном режиме работы ГЛПД генерировал узкополосный (≈14 МГц) шумовой сигнал при неравномерности спектра ≈10 дБ, во втором — ≈6 МГц. В работе [7] экспериментально исследовано изменение спектра колебаний генератора на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) 7-мм диапазона волн под воздействием гармонического низкочастотного колебания (3 МГц) на цепь питания ЛПД. Показано, что превышение амплитудой низкочастотного колебания пускового отрицательного напряжения при положении рабочей точки на вольт-амперной характеристике (ВАХ) диода, как вблизи пускового тока (пускового отрицательного напряжения), так и больше него, приводит к импульсному режиму генерации и, следовательно, к хаотизации колебаний. Однако в работах [6, 7] изучались только особенности трансформации спектра одночастотной генерации в непрерывный спектр шумового сигнала, а исследований изменений, сопутствующих этой трансформации спектра во временной области, проведено не было. В зарубежной литературе в открытом доступе о подобных работах не сообщается. Все работы в основном, как теоретические, например [8], так и экспериментальные [9], направлены на реализацию возможности уменьшения шумовой составляющей в ГЛПД.

Задача данной работы — исследовать развитие процесса хаотизации колебаний в ГЛПД при воздействии на цепь питания ЛПД гармонического колебания при той же частоте 3 МГц, что и в работе [7], не только в спектральной, но и во временной области.

Поскольку аппаратура для наблюдения реализаций высокочастотной генерации с частотой ≈38 ГГц без переноса вниз по частоте нам не известна, то решение задачи было осуществлено путем наблюдения сигнала модуляции с выхода амплитудного детектора, включенного на выходе ГЛПД.

В связи с тем, что детальное исследование преобразования спектра одночастотного ВЧ-сигнала при воздействии на цепь питания ЛПД гармонического колебания при частоте 3 МГц представлено в работе [7], все внимание в эксперименте было направлено на регистрацию временной реализации сигнала с амплитудного детектора при генерации шумового сигнала, наблюдаемого на экране анализатора спектра С4–60. Именно характер этой реализации должен был дать ответ, каким образом (НЧ) регулярный сигнал воздействия преобразуется в ВЧ-сигнал с непрерывным спектром. Конечно, наблюдался и последовательно регистрировался весь процесс преобразования спектра ВЧ-сигнала по мере увеличения амплитуды НЧ-сигнала воздействия.

Для экспериментов был выбран ГЛПД 7-мм диапазона с новым диодом КА717 Б в той же генераторной камере [7]. Но пусковой ток генерации у ГЛПД был 40 мА. По мере увеличения тока происходила токовая перестройка частоты генерации, и при токе чуть меньше 60 мА она была f = 38,67 ГГц, а при токе 60 мА возникал автономный режим генерации шума, который при токе 63 мА вновь сменялся одночастотной генерацией. Поэтому эксперименты были проведены при токе 42 мА вблизи пускового тока, а затем

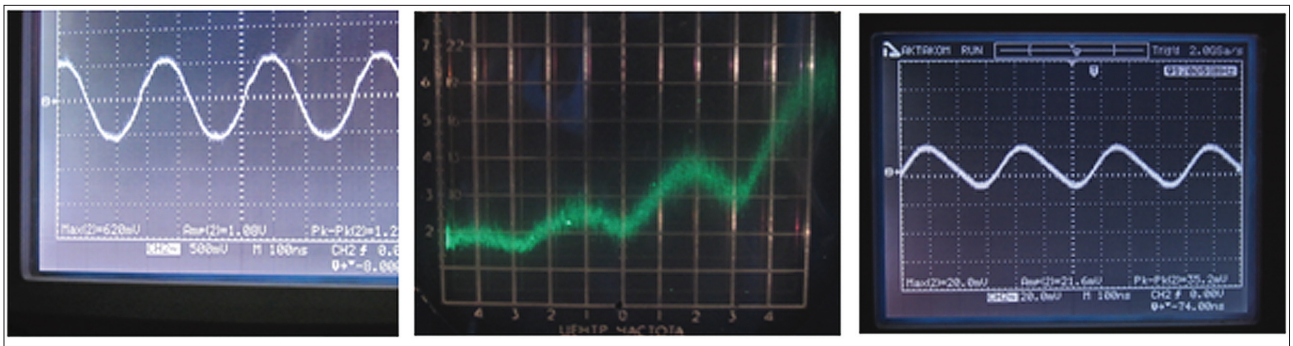

Рис. 1. Характеристики режима с непрерывным спектром ВЧ-генерации в ГЛПД при НЧ-воздействии при токе диода 42 мА: а) НЧ-сигнал воздействия на диоде; б) спектр ВЧ-сигнала, 2 МГц/деление; в) сигнал с детектора, А — 20 мВ/деление, Т — 100 нс/деление

и при токе 38 мА, то есть меньше пускового. При токе 42 мА частота генерации составляла 38,4 ГГц.

По мере увеличения амплитуды НЧ гармонического сигнала воздействия спектр одночастотного ВЧ-сигнала сначала становился многочастотным, а затем и непрерывным [7]. При этом трансформировался и сигнал с детектора. Сначала, при малом НЧ-сигнале он повторял синусоидальный характер этого сигнала, но по мере увеличения его амплитуды характер модуляции менялся. Она становилась треугольной, причем в виде неравнобедренного треугольника, уже при генерации многочастотного ВЧ-сигнала.

С увеличением амплитуды НЧ гармонического сигнала воздействия и расширения спектра многочастотного ВЧ-сигнала ее вид практически не менялся, оставаясь таким и при генерации шумового сигнала. На рис. 1(а–в) при токе диода 42 мА представлены: сигнал НЧ-воздействия на диоде при чувствительности осциллографа А = 500 мВ/деление и скорости развертки Т = 100 нс/деление (а), спектр ВЧ-сигнала на анализаторе спектра С4–60 (б) и сигнал с амплитудного детектора (в).

Как видно из рис. 1а, НЧ-сигнал воздействия на цепь питания диода в точке ее подключения к диоду (на диоде) имеет синусоидальный вид, а ее амплитуда ≈1 В. На рис. 1б при цене деления 2 МГц представлена часть спектра ВЧ-сигнала с шириной его ≈25 МГц с периодической неравномерностью ≈5 МГц, а на рис. 1в — сигнал с детектора. Как видно на рис. 1в, сигнал с детектора представляет собой сигнал НЧ-модуляции в виде неравнобедренного треугольника и никакого шума в сигнале модуляции не наблюдается. Объясняется это тем, что данная реализация была получена при ослаблении 11,3 дБ аттенюатора Д3–36 А, расположенного в основном ВЧ-тракте на выходе ГЛПД. Оказалось, что существенно меньшую по амплитуде ВЧ-модуляцию

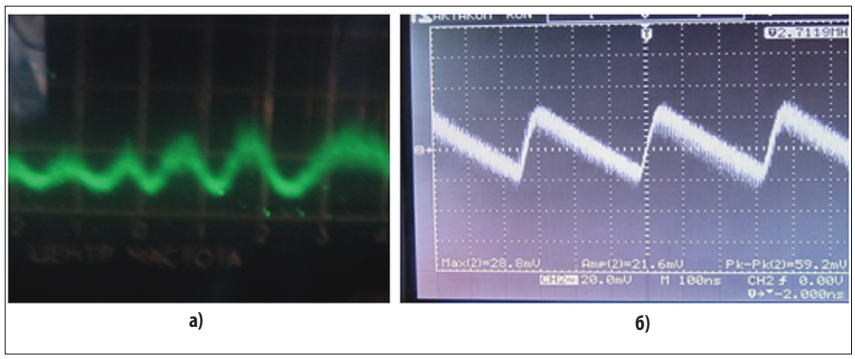

Рис. 2. Характеристики режима с непрерывным спектром ВЧ-генерации в ГЛПД при НЧ-воздействии при токе диода 38 мА: а) спектр ВЧ-сигнала, 5 МГц/деление; б) сигнал с детектора, А — 100 мВ/деление, Т — 100 нс/деление

в сигнале с детектора при такой большой амплитуде НЧ-модуляции наблюдать практически невозможно.

При токе диода 38 мА одночастотная генерация не возбуждалась. Но при увеличении амплитуды воздействующего НЧ-сигнала на диоде до ≈1,6 В возбуждался шумовой сигнал с существенно меньшей мощностью ≈0,45 мВт. На анализаторе спектра С4–60 наблюдался шумовой ВЧ-сигнал с большей шириной спектра ≈40 МГц. В результате существенно уменьшилась амплитуда НЧ-модуляции сигнала с детектора, что дало возможность наблюдать наряду с НЧ неравнобедренной треугольной модуляцией и ВЧ-модуляцию в виде хаотически возникающих импульсов на ее длинной стороне.

На рис. 2(а, б) при токе диода 38 мА представлены: спектр ВЧ-сигнала с экрана анализатора спектра С4–60 (а) и НЧ-сигнал с ВЧ-заполнением с детектора при чувствительности А = 20 мВ/деление для скорости Т развертки при 100 нс/деление (б).

Как видно на рис. 2а, характер спектра не изменился, но его ширина увеличилась до ≈40 МГц. Уже на осциллограмме

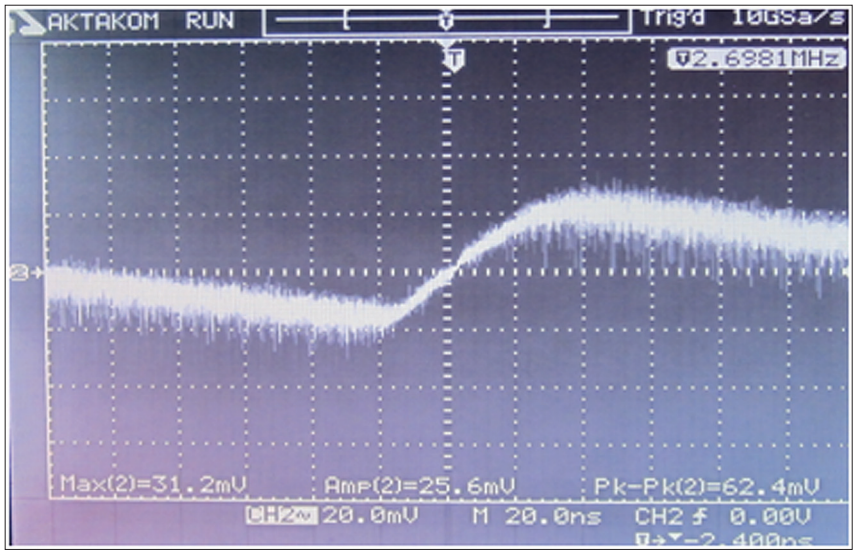

Рис. 3. Сигнал с детектора при токе диода 38 мА: А — 20 мВ/деление, Т — 20 нс/деление

рис. 2б видно, что модуляция ВЧ-сигнала ГЛПД приобретает пилообразную форму, а на длинной стороне неравнобедренного треугольника НЧ-модуляции наблюдаются высокочастотные импульсы. Они возникают случайным образом на всей длинной стороне треугольной модуляции, но не могут быть разрешены при этой скорости развертки. Поэтому на рис. 3 представлен НЧ-сигнал с ВЧ-заполнением длинной стороны треугольной модуляции с детектора при чувствительности 20 мВ/деление и скорости развертки при 20 нс/деление. Но и здесь они визуально могут быть идентифицированы только приблизительно. Такая скорость развертки (20 нс/деление) была выбрана как наиболее приемлемая для наблюдения обеих сторон неравнобедренной треугольной модуляции на осциллографе АСК 2104.

Как видно на рис. 3, шумовые колебания возникают еще на короткой стороне вблизи вершины треугольной модуляции, то есть при изменении знака производной dU/dt. По грубой оценке можно считать, что на одно деление в 20 нс возникает ≈10–12 импульсов разной амплитуды и с разными интервалами между ними, распределенными случайно. Следовательно, эти шумовые колебания реализуются вблизи частоты ≈0,5–0,6 ГГц.

На основе результатов экспериментов можно сделать следующие выводы. Во-первых, гипотеза о том, что процесс генерации шума носит импульсный характер [7] полностью подтвердилась. Однако есть и отличие в объяснении перехода ГЛПД в этот режим. Разрыва огибающей при увеличении амплитуды НЧ-сигнала воздействия в сигнале с детектора, как предполагалось в работе [7], не наблюдается. Процесс преобразования ВАХ диода синусоидальной формы НЧ-сигнала сводится к постепенному ее переходу в форму неравностороннего треугольника (в форму «пилы»). Как показано в работе [10], спектр такого сигнала является многочастотным. Именно поэтому по мере увеличения длинной стороны этой треугольной модуляции спектр ВЧ-сигнала постепенно усложняется и расширяется, оставаясь до определенной величины внешнего гармонического НЧ-сигнала многочастотным. Наконец, при превышении этой величины перезарядка конденсаторов диода (*p-n*-перехода и корпуса), определяющая последовательность пробоев и импульсов наведенного тока, начинает не успевать за изменением тока, что в результате приводит к сбою амплитуды и фазы моментов появления таких импульсов. А это, в свою очередь, приводит к сбою амплитуды и фазы всех составляющих многочастотного спектра ВЧ-сигнала. При этом ширина спектра увеличивается по мере увеличения амплитуды НЧ-сигнала, так как модуляция захватывает все большие участки характеристики изменения частоты генерации от тока диода при автономном режиме работы ГЛПД.

Таким образом, преобразование характера спектра из многочастотного в непрерывный спектр, а сигнала из регулярного в шумовой, при определенном уровне НЧ гармонического сигнала воздействия происходит в результате превращения регулярных моментов пробоев обратно смещенного *p-n*-перехода в нерегулярные (случайные). Можно показать, что перенос шумового характера спектра вверх по частоте происходит за счет сбоев амплитуды и фазы импульсов наведенного тока, частота повторения которых в данном конкретном случае 0,5–0,6 ГГц (рис. 3), что приводит к сбою амплитуды и фазы периодического многочастотного колебания 7-мм диапазона длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кислов В. Я., Мясин Е. А., Залогин Н. Н. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью//Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 10.*
2. *Кислов В. Я. Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронно-волновых системах и автогенераторах с запаздыванием и сильной нелинейностью//Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. № 8.*
3. *Максимов Н. А. Сверхширокополосный генератор хаотических колебаний микроволнового диапазона с дополнительным нелинейным контуром//Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. Вып. 23.*
4. *Мясин Е. А., Котов В. Д. Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн//Радиотехника. 2005. № 3.*
5. *Мясин Е. А., Котов В. Д. Генератор СВЧ шумовых колебаний. Патент № 2614925 РФ. Опубл. 30.03.2017. Бюл. № 10 с приоритетом от 17.12. 2015.*
6. *Кокорин И. А. Особенность режима глубокой модуляции тока питания ГЛПД//Электронная техника. Сер. 1. Вып. 2. 1984.*
7. *Мясин Е. А., Котов В. Д. Воздействие низкочастотным шумовым сигналом на цепь питания ЛПД-генератора одночастотных и хаотических колебаний миллиметрового диапазона волн//Радиотехника и электроника. 2018. Т. 63. № 9.*
8. *Sjolund A. Noise at large amplitude in IMPATT oscillators//International Journal of Electonics. 1973. Vol. 34. No. 4.*
9. *Okamoto H., Ikeda M. Injection-locked ultra-high frequency solid-state oscillator. Patent US 4099144 A. 26.04.1976. Publication date 04. 07. 1978.*
10. *Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское радио, 1963.*