

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

Продолжено экспериментальное исследование воздействия низкочастотного (НЧ) колебания (3 МГц) на цепь питания одночастотного сверхвысокочастотного (СВЧ) генератора на ЛПД (ГЛПД). Впервые показано, что возбуждение СВЧ шумовых колебаний и максимальное расширение спектра высокочастотного шума при увеличении амплитуды низкочастотных колебаний связано с кратковременным уменьшением тока диода ниже пускового тока СВЧ генерации в ГЛПД.

В работе [1] было обнаружено неизвестное ранее явление — трансформация спектра одночастотного ЛПД генератора (ГЛПД) 3-см диапазона длин волн в непрерывный спектр шумового сигнала при воздействии на его цепь питания гармоническим колебанием частотой 150 кГц — 1 МГц. В недавней публикации [2] это явление было детально исследовано при воздействии на ГЛПД 7-мм диапазона гармоническим колебанием частотой 3 МГц, а именно изучено изменение спектра высокочастотного сигнала при изменении амплитуды низкочастотного (НЧ) колебания воздействия на цепь питания ЛПД. В работе [2] была также предложена гипотеза относительно причины такой трансформации спектра одночастотного сигнала 7-мм диапазона. Однако для подтверждения этой гипотезы нужна была дополнительная доказательная база, поскольку исследования были проведены только для изменения спектра генерируемого ГЛПД СВЧ сигнала от изменения амплитуды воздействующего гармонического низкочастотного колебания. Необходимо было исследовать причину этих изменений во временной области.

В работе [3] частично проведено такое исследование развития процесса хаотизации колебаний в ГЛПД при воздействии на цепь питания ЛПД гармонического колебания при той же частоте 3 МГц не только в спектральной области [2], но и во временной области. Для экспериментов был выбран ГЛПД 7-мм диапазона с новым диодом КА717 Б в той же генераторной камере [2]. Однако пусковой ток генерации у ГЛПД был выше: не 20,

а 40 мА. Эксперименты были проведены при токе 42 мА вблизи пускового тока, а затем и при токе 38 мА, то есть меньше пускового.

К сожалению, продолжить эксперименты с этим ГЛПД и зафиксировать одновременно реализации с детектора и воздействующего регулярного НЧ колебания не удалось, так как сгорел диод. Отметим, что для экспериментов с этим ГЛПД использовалась многорезонансная волноводно-коаксиальная генераторная камера [4, 5], специально изготовленная для реализации в ней режима хаотических колебаний.

В данной работе эксперименты по воздействию внешнего гармонического низкочастотного (3 МГц) колебания на ГЛПД также 7-мм диапазона проводились, чтобы одновременно зафиксировать реализации с детектора и реализации воздействующего НЧ регулярного колебания. Кроме того, было решено исключить возможное влияние автономных режимов генерации шума, которые имели место в волноводно-коаксиальной камере [4, 5], специально разработанной для этой цели, то есть для генератора шума (ГШЛПД) при увеличении рабочего тока диода. Поэтому была использована волноводная камера, в которой генерация хаотических колебаний не возбуждалась при увеличении рабочего тока диода от пускового (40 мА) до максимального тока (100 мА) при работе в непрерывном режиме.

В качестве источника внешнего гармонического сигнала использовался генератор Г3–112. С его выхода через емкость в 1000 мкФ сигнал по-

ступал на вход делителя, состоящего из двух сопротивлений  $R$  и  $r_d$ , где  $R$  — внешнее сопротивление  $\approx 1,33$  кОм, а  $r_d$  — внутреннее сопротивление диода. Задача этого эксперимента, как и в работе [3], заключалась в том, чтобы проследить за изменением характера СВЧ сигнала во времени. Для этого необходимо было наряду с наблюдением изменения спектра сигнала следить за его изменением во времени под воздействием внешнего гармонического НЧ колебания. Так же, как и в работе [3], такую информацию можно было получить при наблюдении огибающей генерируемого СВЧ сигнала, регистрируя сигнал огибающей с выхода амплитудного детектора. Наблюдение реализаций НЧ колебания с выхода амплитудного детектора осуществлялось, как и в работе [3], с помощью двухлучевого осциллографа АСК 21–04.

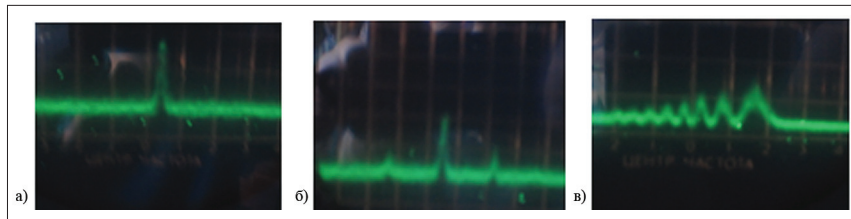
Схема экспериментальной установки включала ГЛПД 7-мм диапазона, с выхода которого СВЧ сигнал через ферритовый вентиль поступал на вход аттенюатора с изменяющимся ослаблением Д3–36 А. С выхода аттенюатора СВЧ сигнал через основную канал двух одинаковых направленных ответвителей поступал в согласованную нагрузку. К их боковым плечам с ослаблением в каждом 13 дБ были соответственно подключены анализатор спектра С4–60 и измеритель мощности М3–44. Это связано с тем, что, как оказалось в процессе исследования, сигнал с выхода детектора для ГЛПД имеет небольшую амплитуду и его можно наблюдать только при включении детекторной секции в основной СВЧ тракт вместо согласованной нагрузки. При

этом аттенюатор ДЗ–36 А, расположенный в высокочастотном тракте между выходом генератора и детектором, должен использоваться при нулевом ослаблении, что накладывало определенные ограничения на возможность одновременного использования анализатора спектра С4–60 и наблюдения временных реализаций с выхода детектора. Для наблюдения спектра одночастотной генерации без внешнего сигнала требовалось вводить ослабление 30–40 дБ. Но по мере увеличения амплитуды гармонического НЧ колебания воздействия ослабление сигнала аттенюатором ДЗ–36 А нужно было постепенно уменьшать, чтобы можно было наблюдать расширение спектра на приборе С4–60, поскольку ширина спектра увеличивалась по мере увеличения амплитуды НЧ колебания воздействия. Спектр СВЧ сигнала сначала становился многочастотным, а затем и непрерывным с неравномерностью, изменяющейся по мере увеличения амплитуды колебания воздействия. Таким образом, **уменьшать ослабление ДЗ–36 А можно было не настолько, чтобы можно было одновременно наблюдать все фазы трансформации спектра и сигнала с детектора.** Из-за этого анализатор спектра приходилось отключать от одного из плеч направленного ответвителя, к которому он был подключен. Для подтверждения этого на рис. 1 представлено изменение характера спектра по мере увеличения амплитуды НЧ колебания воздействия и изменение ослабления аттенюатора ДЗ–36 А, которое необходимо было изменять от 35 до 10 дБ.

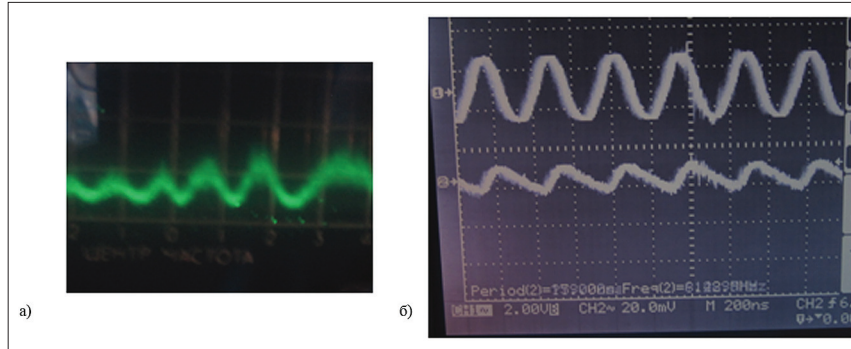
Сигнал с детектора не мог быть зарегистрирован из-за его малой величины. При генерации как многочастотного СВЧ сигнала, так и шумового СВЧ сигнала при входном (НЧ) колебании воздействия амплитудой меньше 1 В сигнал с детектора не мог быть зарегистрирован из-за его малой величины. Это стало возможно при генерации шумового сигнала только при амплитуде входного НЧ колебания на диоде  $\approx 1$  В на пределе чувствительности осциллографа АСК 21–04.

Как видно на рис. 2а, ширина спектра СВЧ сигнала составляет величину порядка 100 МГц. Характер входного сигнала на диоде (рис. 2б) — это синусоида, а сигнал с детектора имеет форму неравнобедренного треугольника, но заметить какие-либо другие особенности невозможно. Дальнейшее увеличение амплитуды НЧ входного колебания дает возможность увидеть эти особенности, представленные на рис. 3.

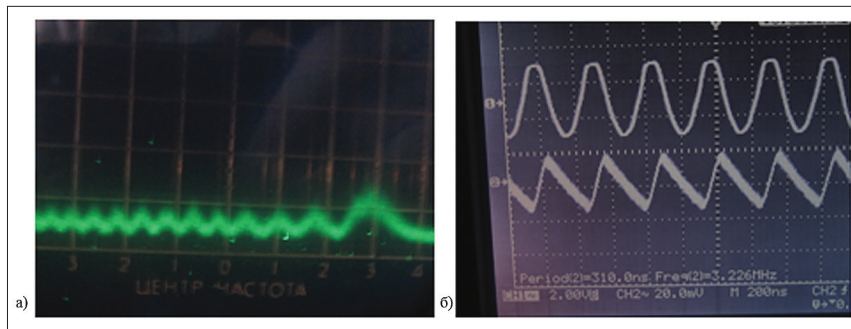
Как видно на рис. 3а, ширина спектра СВЧ сигнала составляет теперь величину порядка 200 МГц. Характер входного сигнала на диоде (рис. 3б), — это почти синусоида, а сигнал с детектора не толь-



▲ **Рис. 1.** Изменения спектра сигнала по мере изменения амплитуды НЧ колебания воздействия и ослабления аттенюатора ДЗ–36А: а) без сигнала (ослабление –35 дБ); б) 2 МГц/дел (ослабление –30дБ); в) 5 МГц/дел (ослабление –10 дБ)



▲ **Рис. 2.** а) Спектр (масштаб 10 МГц/дел) и б) реализации НЧ колебания воздействия (амплитуда  $\approx 1$  В) и сигнала с детектора (амплитуда  $\approx 6$  мВ)



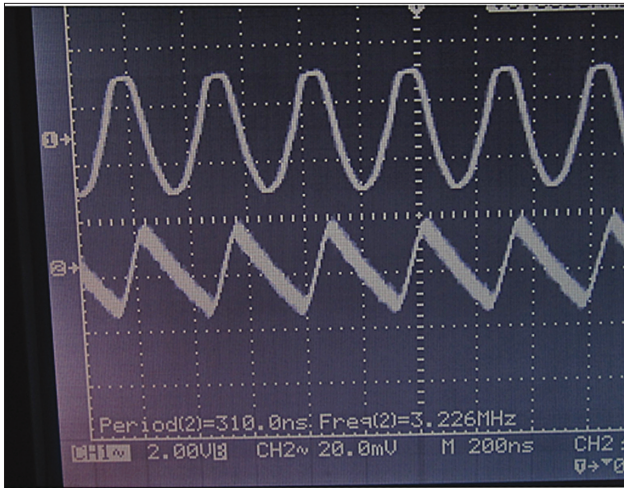
▲ **Рис. 3.** а) Спектр (масштаб 20 МГц/дел) и б) реализации НЧ колебания воздействия (амплитуда  $\approx 2$  В) и сигнала с детектора (амплитуда  $\approx 10$  мВ)

ко имеет форму неравнобедренного треугольника, но, кроме того, на длинной стороне этого треугольника наблюдаются высокочастотные шумовые колебания, как и в работе [3].

Если считать, что сопротивление работающего диода  $\approx 8$ –10 Ом, то при максимальной амплитуде  $\approx 2$  В (рис. 3б) максимальная амплитуда тока через диод должна была бы быть  $\approx 250$ –200 мА как в большую, так и в меньшую сторону от значения рабочего тока диода. Однако в меньшую сторону амплитуда тока ограничена пусковым режимом при непрерывной работе, то есть следующим затем резким увеличением сопротивления диода. Именно поэтому модуляция амплитуды на выходе генератора (из-за ограничения на нелинейном участке ВАХ) имеет вид неравнобедренного треугольника.

Как и в работе [3], данный эксперимент показал, что никакого разрыва амплитуды модулирующего сигнала, как предполагалось в работе [2], при этом не происходит. Связано это с тем, что ВАХ диода (ЛПД) «подвешена» на –17 В (–27 В) над потенциалом «зем-

ли» (0 В) в отличие от прямой ветви ВАХ диода, которая используется в выпрямителях. На этом рисунке отчетливо видно, что когда амплитуда внешнего сигнала превышает по абсолютной величине напряжение, соответствующее пусковому току (а не отсечки тока диода, как предполагалось в работе [2]), ничего не происходит с напряжением на детекторе и оно растет вслед за увеличением амплитуды внешнего гармонического НЧ колебания. При этом никаких высокочастотных колебаний на короткой стороне треугольной модуляции не наблюдается. Они появляются на длинной стороне треугольной модуляции только тогда, когда амплитуда внешнего гармонического НЧ колебания уменьшается до такого уровня, при котором **через диод начинает вновь течь ток, превышающий пусковой.** При переходе на ветвь ВАХ с линейной зависимостью тока диода от приложенного напряжения подобного ограничения нет. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо рассмотреть рис. 3 б в более крупном масштабе (рис. 4).



▲ **Рис. 4.** Реализации НЧ колебания воздействия (амплитуда  $\approx 2$  В) и сигнала с детектора (амплитуда  $\approx 20$  мВ)

На рис. 4 видно, что генерация шумового сигнала на длинной стороне модуляции прекращается, когда положительное значение амплитуды воздействующего НЧ гармонического колебания достигает величины, при которой ток диода, уменьшаясь, становится меньше пускового тока. Дальнейшее увеличение напряжения воздействия в положительную сторону приводит к прекращению генерации. Она возникает, только когда, уменьшаясь, положительное значение амплитуды напряжения вновь достигает значения, соответствующего пусковому току.

На основе результатов экспериментов можно сделать следующие выводы. Во-первых, гипотеза о том, что процесс генерации шума носит импульсный характер [2] полностью подтвердилась еще в работе [3]. Подтвердилось (и это главное) предположение о том, что причиной, приводящей ГЛПД к генерации шума при воздействии гармонического колебания на его цепь питания, является прерывание генерации и возбуждение ее вновь при новых начальных условиях.

Действительно, на основе результатов экспериментов можно также утверждать, что в ГЛПД при модуляции гармоническим НЧ колебанием реализуются два различных состояния. Они особенно ярко представлены на рис. 4. Первое соответствует короткой стороне треугольной модуляции. Второе соответствует длинной стороне этой модуляции. На длинной стороне треугольной модуляции можно наблюдать генерацию шумового сигнала, в то время как на короткой стороне всякая генерация отсутствует. Как показал эксперимент [3], при уменьшении рабочего тока диода меньше пускового интегральная выходная мощность резко снижалась, как и амплитуда треугольной модуляции. Отсюда следует, что уменьшалось время пребывания системы в состоянии с превышением пускового тока ГЛПД. Для

отбора СВЧ мощности из электродинамической системы ГЛПД в нагрузку при непрерывной генерации требуется существенно больший ток, чем при токе меньше пускового. Это обусловлено тем, что в последнем случае количество носителей в пространственном заряде, движущемся в пространстве дрейфа диода в нужной фазе СВЧ поля, недостаточно для возбуждения генерации в ГЛПД. Для возбуждения генерации на заданной им частоте их излучение не может компенсировать омические потери в резонаторе ГЛПД. Поэтому следует сделать вывод, что на короткой стороне треугольной модуляции через обратно смещенный переход диода короткое время течет существенно меньший ток, чем на длинной стороне треугольной модуляции, где реализуется генерация шума. Пребывание системы в этом состоянии определяется временем нахождения положительного напряжения модулирующей синусоиды (до и после максимума) выше напряжения, соответствующего пусковому току. Эта пауза, как и предполагалось в [2], обеспечивает потерю корреляции вновь возникающего колебания с предыдущим. Поскольку была прервана генерация многочастотного сигнала, то возбуждение колебаний может начаться с новыми начальными условиями на любой частоте из предшествующего многочастотного СВЧ сигнала и «блуждать» в поисках его новой реализации в течение всей длинной стороны треугольной модуляции. При этом регулярная перезарядка конденсаторов диода (*p-n*-перехода и корпуса), определяющая последовательность пробоев и импульсов наведенного тока, нарушается, что в результате приводит к сбою амплитуды и фазы моментов появления этих импульсов. А это, в свою очередь, вызывает сбой амплитуды и фазы всех составляющих многочастотного спектра СВЧ сигнала. При этом ширина спектра увеличивается по мере увеличения амплитуды НЧ колебания воздействия, так как модуляция захватывает все большие участки изменения частоты генерации от тока на ВАХ диода при автономном режиме работы ГЛПД. ●

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кокорин И. А. Особенности режима глубокой модуляции тока питания генераторов на ЛПД // *Электронная техника. Сер. 1. Вып. 2.* 1984.
2. Мясин Е. А., Котов В. Д. Хаотизация колебаний в одночастотном генераторе на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона волн под воздействием низкочастотного гармонического колебания // *РЭ. 2018. Т. 63. № 9.*
3. Мясин Е. А., Котов В. Д. Генерация шума в одночастотном генераторе миллиметрового диапазона волн под воздействием низкочастотного гармонического колебания // *СВЧ ЭЛЕКТРОНИКА. 2020. № 2.*
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.*