

# Генерация хаотических импульсных сигналов в схемах «шумотрона» на основе пролетных клистронов и ЛБВ-усилителей

С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, В.Н. Скороходов

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** в работе приводятся результаты экспериментального исследования режимов генерации хаотических импульсных сигналов в двух схемах «шумотрона», в одной из которых используются два пролетных клистрона, а в другой – пролетный клистрон совместно с ЛБВ-усилителем. В первой схеме в качестве нелинейного элемента выступает пролетный клистрон, а во второй схеме – ЛБВ-усилитель. Показано, что в первой схеме шумотрона наблюдается автономная генерация хаотических импульсов «гигантской» амплитуды с длительностью порядка 60 нс. Во второй схеме, на хаотическом амплитудном фоне формируются импульсы, напоминающие по виду связанные состояния темных и антитемных солитонов огибающей. Существование последних было предсказано теоретически ранее для бистабильных нелинейных систем с дисперсией.

**Ключевые слова:** шумотрон, ЛБВ-усилитель, пролетный клистрон, бистабильность

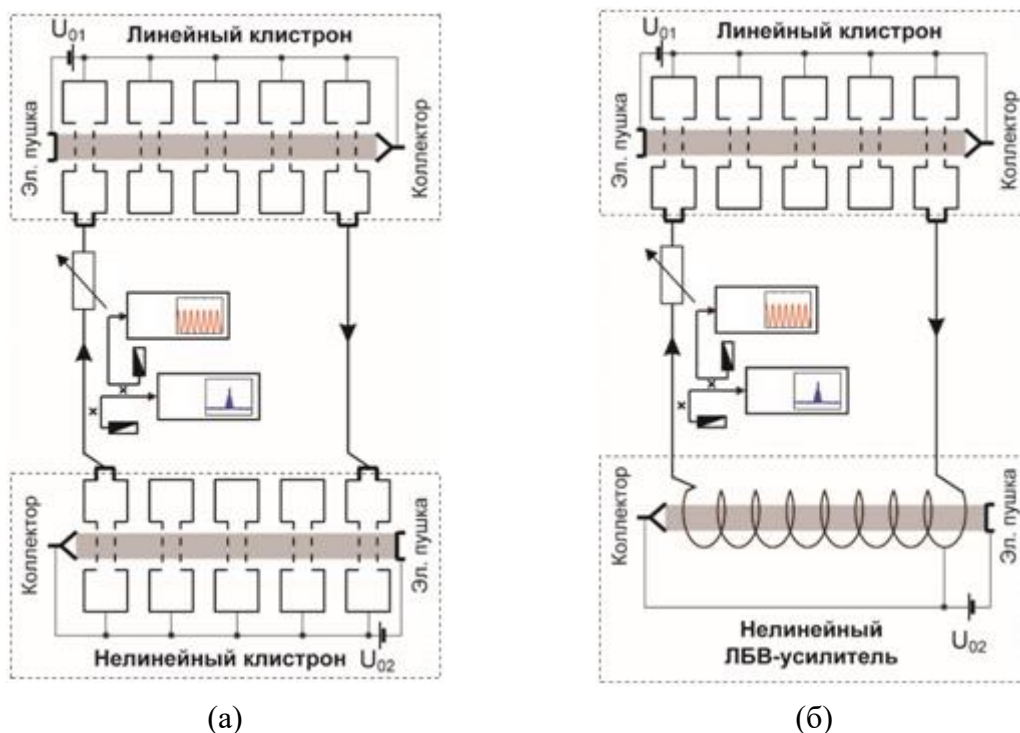
## 1. Введение

Впервые генерация широкополосного хаотического СВЧ-сигнала в кольцевой автоколебательной системе, состоящей из двух последовательно соединенных ЛБВ-усилителей, была обнаружена в 50-60-х годах прошлого века научным коллективом, возглавляемым Кисловым В.Я. [1-3]. В указанном автогенераторе, получившем название «шумотрон», одна из ЛБВ работала в линейном режиме усиления, а другая – в сильно нелинейном режиме. Наличие падающего участка на мощностной характеристике нелинейной ЛБВ, обуславливало развитие в динамической системе амплитудного механизма модуляции сигнала, а генерация сигнала на частотах нескольких кольцевых мод было связано с частотным механизмом модуляции. В начале 2000-х годов появились экспериментальные и теоретические работы, в которых исследовалась хаотическая динамика кольцевой автоколебательной системы на основе другого вакуумного СВЧ-усилителя - пятирезонаторного пролетного клистрона [4-6]. В отличие от шумотрона, выполненного на основе ЛБВ-усилителей, в клистронном автогенераторе присутствовал только амплитудный механизм модуляции сигнала, что приводило к генерации относительно узкополосного непрерывного хаотического СВЧ-сигнала. В эти же годы были проведены исследования хаотической динамики каскадного клистронного автогенератора, в котором, как и в классической схеме шумотрона, один из усилителей работал в линейном режиме усиления, а другой – в сильно нелинейном режиме [7]. Однако полученные здесь экспериментальные результаты касались в основном определения значений пускового тока, при которых наблюдалась сложная динамика, и сравнения полученных значений пускового тока с аналогичными значениями, полученными в автогенераторе с одним пролетным клистроном. Генерация же хаотических СВЧ-импульсов в схемах шумотрона с нелинейным ЛБВ-усилителем или пролетным клистроном была реализована только при использовании внешнего импульсного воздействия [8, 9]. В настоящей работе впервые демонстрируется возможность автономной генерации хаотических импульсных сигналов в схемах шумотрона, выполненных

на основе пролетных клистронов и ЛБВ-усилителей, за счет бистабильности нелинейного усилителя.

## 2. Схемы шумотронов и результаты экспериментального исследования

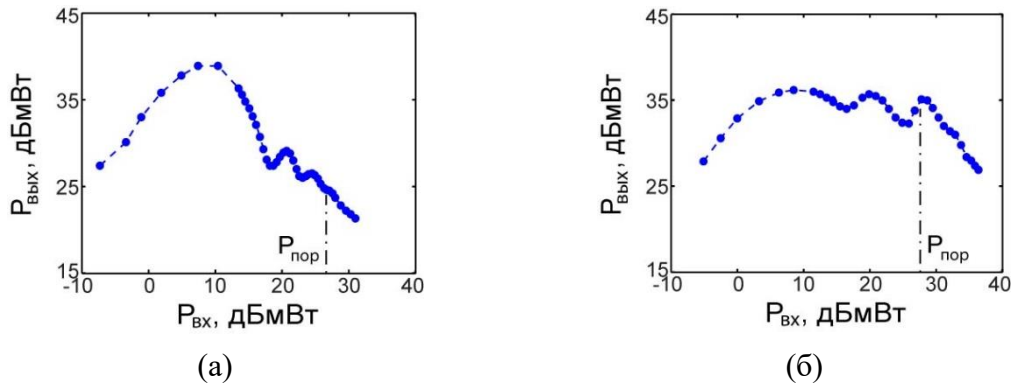
На рисунке 1 приведены две схемы шумотрона. В первой схеме шумотрона (см. рисунок 1а) используются два пятирезонаторных пролетных клистрона средней мощности типа КУ-134Е, один из которых работает в малосигнальном режиме (режим линейного усиления), а другой в сильно нелинейном режиме. Во второй схеме (см. рисунок 1б) в качестве нелинейного элемента используется ЛБВ-усилитель со спиральной замедляющей системой. Уровень мощности сигнала на входе линейного усилителя в обеих схемах регулируется с помощью переменного аттенуатора. Генерируемый СВЧ-сигнал с выхода нелинейного усилителя через направленные ответвители поступает на входы анализатора спектра и осциллографа реального времени для анализа и последующей обработки.



**Рисунок 1.** Схематическое изображение шумотронов, выполненных на основе двух пролетных клистронов (а) и пролетного клистрона совместно с ЛБВ-усилителем (б).

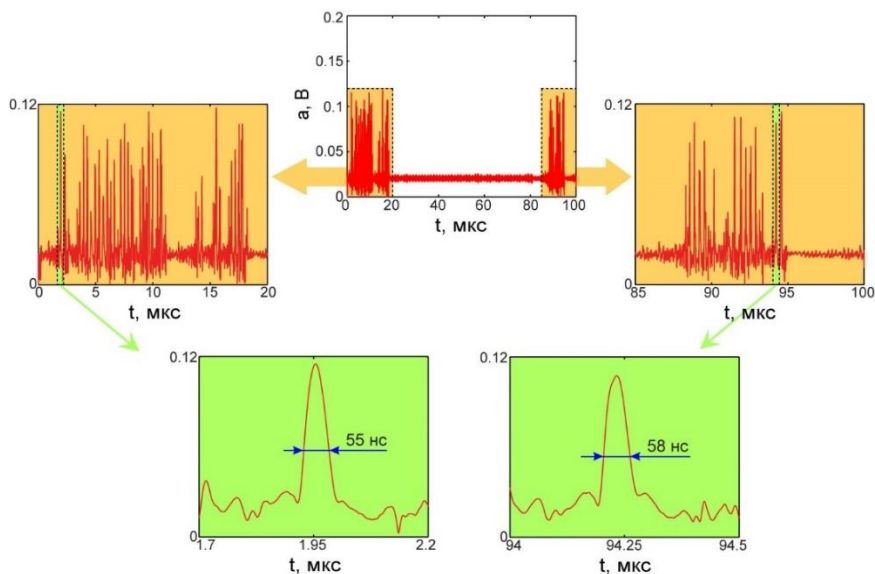
На рисунке 2 приведены мощностные характеристики двух нелинейных элементов – пятирезонаторного пролетного клистрона и ЛБВ-усилителя. Из представленных на рисунке 2 результатов следует, что на мощностных характеристиках обоих нелинейных элементов наблюдаются два N-образных участка, возникновение которых обусловлено перегруппировкой электронов в пучке. Такое поведение мощностных характеристик дает основание полагать о наличии бистабильности как у пролетного клистрона, так и у ЛБВ-усилителя. Штрихпунктирными линиями на обоих рисунках показаны уровни входной мощности, при которых в шумотроне с данными нелинейными бистабильными элементами наблюдается генерация хаотических импульсов.

На рисунке 3 приведены фрагменты временной реализации хаотического СВЧ-сигнала, генерируемого в схеме шумотрона на основе каскада из двух пятирезонаторных пролетных клистронов. Данный сигнал генерируется в режиме перемежаемости, когда его уровень интегральной мощности находится выше уровней



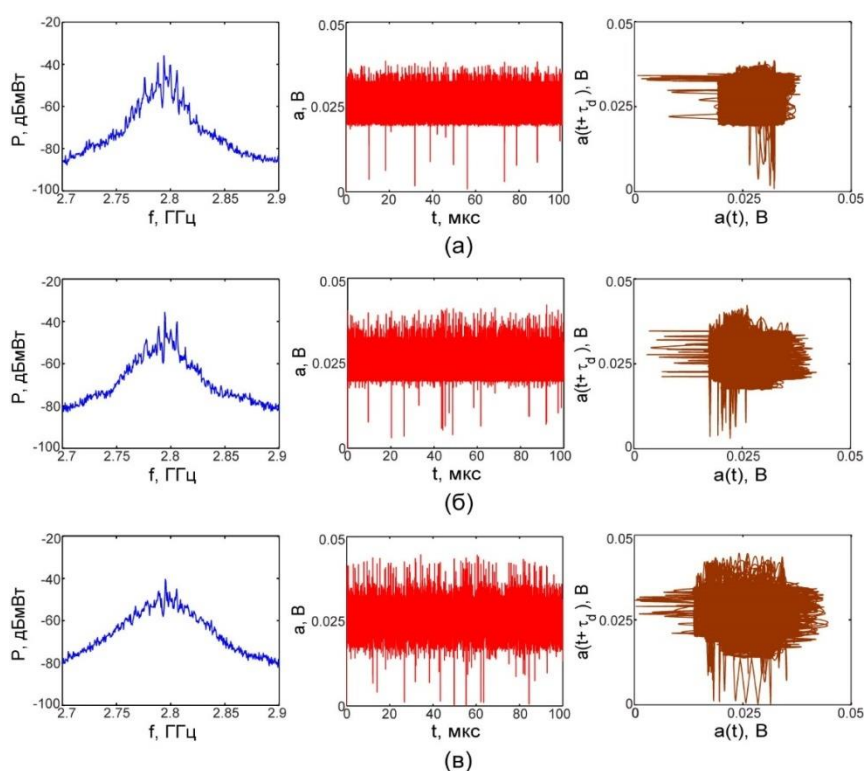
**Рисунок 2.** Мощностные характеристики нелинейного пятирезонаторного пролетного клистрона, используемого в первой схеме шумотрона, (а) и нелинейного ЛВВ-усилителя, используемого во второй схеме шумотрона (б). Мощностные характеристики обоих усилителей измерены на центральной частоте клистрона  $\sim 2.8$  ГГц, на которой возникает генерация сигнала в кольце.

входной мощности, при которых на мощностной характеристике нелинейного пролетного клистрона наблюдаются два ярко выраженных минимума. Этот уровень отмечен на рисунке 2а штрихпунктирной линией. Как следует из результатов, представленных на рисунке 3, генерируемый хаотический СВЧ-сигнал представляет собой хаотическую последовательность импульсов «гигантской» амплитуды, пиковые значения которых в 3-4 раза превышают величину амплитудного пьедестала. Измерения пиковой мощности указанных структур показали, что она на 15 дБ превышает среднюю мощность генерируемого многочастотного сигнала, т.е. данные импульсы действительно являются импульсами «гигантской» амплитуды. Как следует из увеличенных фрагментов временной реализации длительность отдельно взятого импульса, измеренная по половинному уровню амплитуды от ее максимального значения, составляет величину  $T_d \approx 60$  нс, что не превышает время прохождения сигнала через клистрон-усилитель. Представленные на рисунке 3 результаты напоминают по виду последовательности хаотических импульсов, которые генерируются в режиме перемежаемости в бистабильных системах в отсутствие внешнего воздействия [10].



**Рисунок 3.** Фрагменты временной реализации, на которых показаны импульсы «гигантской» амплитуды. Результаты получены при значениях тока пучка  $I_2=42$  мА и ускоряющего напряжения  $U_{02}=2110$  В нелинейного клистрона-усилителя, а также тока пучка  $I_1=45$  мА и ускоряющего напряжения  $U_{01}=2200$  В линейного клистрона-усилителя.

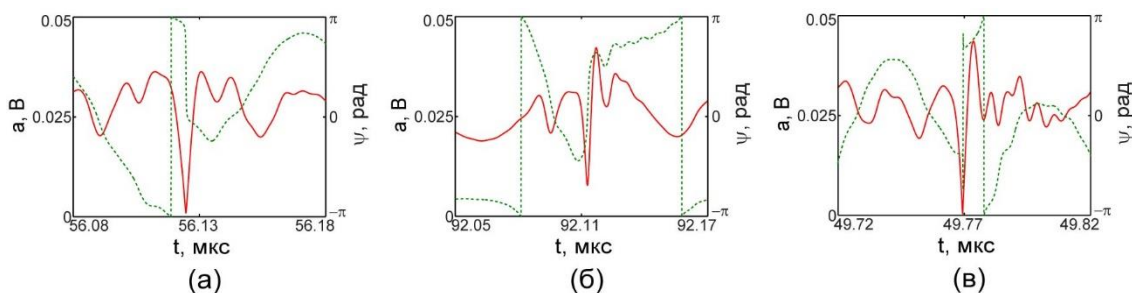
На рисунке 4 приведены экспериментальные результаты, полученные на схеме шумотрона, в которой в качестве нелинейного диспергирующего элемента используется ЛБВ-усилитель. Из представленных на рисунке 4а результатов следует, что при значении тока пучка клистрона  $I_1=36$  мА на хаотическом амплитудном фоне наблюдаются срывы генерации в виде достаточно узких провалов длительностью порядка 20 нс, амплитудный и фазовый профили которых аналогичны амплитудному и фазовому профилю темного солитона (см. рисунок 5а). Дальнейшее увеличение тока пучка клистрона-усилителя (см. рисунок 4б,в) приводит к уменьшению периода следования провалов и к формированию на хаотическом амплитудном фоне связанных импульсов, напоминающих по форме связанные состояния темных и антитемных солитонов огибающей. Теоретически существование связанных состояний в виде темных и антитемных солитонов было предсказано для бистабильных нелинейных систем с дисперсией, описываемых уравнением Шредингера третьей-пятой степени [11]. Указанной системе удовлетворяет схема шумотрона, в которой ЛБВ-усилитель, работая в сильно нелинейном режиме, обладает нормальной положительной дисперсией.



**Рисунок 4.** Спектры мощности (левый столбец), временные реализации (средний столбец) и проекции фазовых портретов на плоскость параметров ( $a(t)$ ,  $a(t + \tau_d)$ ) (правый столбец) сигнала, генерируемого в кольце при различных значениях тока пучка клистрона-усилителя  $I_1$ : 36 мА (а), 40 мА (б) и 45 мА (в). Результаты получены при значениях ускоряющего напряжения клистрона-усилителя  $U_{01}=2300$  В и ЛБВ-усилителя  $U_{02}=2500$  В. Ток пучка ЛБВ-усилителя  $I_2=50$  мА.

### 3. Заключение

В заключении отметим, что представленные в работе результаты могут быть распространены и на более высокочастотные схемы шумотронов микроволнового диапазона частот.



**Рисунок 5.** Амплитудные (сплошные линии) и фазовые (пунктирные линии) профили одиночного импульса – аналога темного солитона огибающей (а) и связанных импульсов, являющихся аналогами связанных состояний в виде темных и антитемных солитонов огибающей (б, в). Временные реализации получены при различных значениях тока пучка клистрона-усилителя  $I_1$ : 36 мА (а), 40 мА (б) и 45 мА (в).

Исследование выполнено за счет гранта **Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00666)**.

#### Список литературы

1. Анисимова, Ю.В. Шумотрон/ Ю.В. Анисимова, Г.М. Воронцов, Н.Н. Залогин [и др.] // Радиотехника. - 2000. - № 2. - С. 19-25.
2. Воронцов, Г.М. Шумотрон с ЛБВ–услителем магнетронного типа/ Г.М. Воронцов, В.Я. Кислов // Радиотехника. - 2000. - № 2. - С. 30-39.
3. Кислов, В.Я. Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием / В.Я. Кислов, Н.Н. Залогин, Е.А. Мясин// Радиотехника и электроника. - 1979. - Т.24. -№ 6. - С. 1118-1130.
4. Дмитриев, Б.С. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием / Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Н.М. Рыскин, А.М. Шигаев// Радиотехника и электроника. - 2001. - Т. 46. -№ 5. - С. 604-610.
5. Дмитриев, Б.С. Сложная динамика многорезонаторных клистронных автогенераторов с запаздывающей обратной связью/ Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, К.К. Кижасева и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. - 2002. - Т.10. -№ 5. - С. 37-49.
6. Дмитриев, Б.С. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью/ Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, Д.В. Клокотов, Н.М. Рыскин // ЖТФ. - 2003. - Т. 73. -№ 7. - С. 105-110.
7. Дмитриев, Б.С. Каскадный клистронный автогенератор с запаздыванием / Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, В.Н. Скороходов [и др.] // ЖТФ. - 2005. - Т. 75. -Вып. 12. - С. 94-97.
8. Дмитриев, Б.С. Синхронизация хаотических колебаний путем подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом/ Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, В.Н. Скороходов, А.М. Геншафт // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. - 2007. - Т. 15. -№ 3. - С. 52-57.
9. Гришин, С.В. Генерация хаотических СВЧ импульсов в широкополосных спин-волновых и вакуумных генераторах хаоса под внешним периодическим воздействием / С.В. Гришин, Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков [и др.] // Изв. ВУЗов - Прикладная нелинейная динамика. - 2012. - Т. 20. - № 5. - С. 137-155.
10. Камилов, М.К. Детерминированный стохастический резонанс в полупроводниковой бистабильной системе / И.К. Камилов, К.М. Алиев, Х.О. Ибрагимов, Н.С. Абакарова // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – Вып.4. – С. 25-32.
11. Crosta, M. Bistability and instability of dark-antidark solitons in the cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation / M. Crosta, A. Fratolocchi, S. Trillo // Physical Review A. - 2011. - Vol. 84. - P. 063809.