

## **Возможности генерации хаотического излучения с малой неравномерностью спектра на основе ЛБВ с запаздывающей обратной связью**

А.А. Иванов<sup>1</sup>, Р.М. Розенталь<sup>2</sup>, М.Н. Вилков<sup>2</sup>, Н.С. Гинзбург<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО НПП «Салют»

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН

**Аннотация:** Определены условия получения шумоподобного излучения с малой неравномерностью спектра в рамках нестационарной распределенной модели лампы бегущей волны с запаздывающей обратной связью. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями макета спиральной ЛБВ С-диапазона, в которой получены широкополосные режимы генерации с интегральной мощностью до 2 Вт.

**Ключевые слова:** лампа бегущей волны, запаздывающая обратная связь, шумоподобное излучение

### **1. Введение**

В настоящее время активно исследуются процессы многочастотного СВЧ-нагрева плазмы, которые требуют непрерывного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов с киловаттным уровнем выходной мощности [1,2]. При этом для подобных задач представляет интерес как излучение с дискретным набором спектральных линий, так и шумоподобное излучение со сплошным спектром.

С точки зрения получения больших мощностей привлекательной выглядит схема в которой задающий генератор ваттной мощности генерирует шумовой сигнал, который поступает на вход широкополосного усилителя с коэффициентом усиления порядка 30 дБ. В качестве подобных усилителей, к примеру, могут быть использованы гирорезонансные ЛБВ на основе винтовых гофрированных волноводов, которые в настоящее время уже реализованы в Ka- и W-диапазонах [3,4].

Одним из вариантов построения широкополосных шумовых задающих генераторов является использование СВЧ усилителей с запаздывающей обратной связью [5], в качестве которых могут быть использованы ЛБВ. Вместе с тем, в большинстве случаев спектр таких источников характеризуется значительной неравномерностью, обусловленной наличием достаточно высокочастотных собственных мод кольцевого резонатора, формируемого петлей обратной связи.

Для улучшения равномерности спектра в ИРЭ РАН было предложено включать в цепь обратной связи ЛБВ нелинейный элемент, обеспечивающий нелинейный амплитудно-зависимый сдвиг фазы сигнала (т.н. нелинейная флуктуирующая задержка) [6-8]. Это приводило к случайному сдвигу собственных частот кольцевого резонатора и размыванию соответствующих спектральных линий. Такие системы, где в качестве нелинейного элемента выступала вторая ЛБВ, работающая в сильно нелинейном режиме, получили название "шумотрон" [9].

При этом в ходе исследований также были обнаружены режимы, в которых шумоподобные сигналы с малой изрезанностью спектра наблюдались и в ЛБВ в цепь обратной связи которой включался, по сути, единственный элемент (кроме

направленного ответвителя) – регулируемый аттенуатор<sup>1</sup>.

Очевидно, подобные режимы работы представляют значительный интерес, в силу заметного упрощения конструкции хаотического генератора (использование единственного усилителя, вместо комбинации двух усилителей).

Ниже будет показано существование режимов хаотической генерации с малой неравномерностью спектра в рамках нестационарной распределенной модели ЛБВ с линейной цепью обратной связи. Выводы теории подтверждены результатами экспериментальных исследований спиральной ЛБВ С-диапазона.

## 2. Исследование нестационарной модели ЛБВ

В приближении малого изменения скорости частиц процесс усиления в ЛБВО может быть описан известной системой уравнений [10,11]:

$$\frac{\partial a}{\partial \zeta} + \frac{\partial a}{\partial \tau} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} = \text{Re}(ae^{i\theta}),$$
(1)

где  $a$  – нормированная амплитуда действующего поля,  $\zeta = \omega Cz/v_0$  и

$\tau = \omega C(t - z/v_0)(1 - v_0/v_{gr})^{-1}$  – нормированные координата и время,  $\omega$  – частота

синхронизма,  $v_0, v_{gr}$  – поступательная скорость электронов и групповая скорость

волны,  $C = \sqrt[3]{eI_0 K / (2mv_0^2)}$  – параметр усиления Пирса,  $I_0$  – ток электронного пучка,

$K$  – сопротивление связи,  $\theta$  – фаза электронов относительной синхронной волны,  $m, e$

– масса и заряд электрона. В предположении, что на входе в пространства взаимодействия электронный поток не имеет начальной модуляции по плотности и скорости частиц, граничные условия для уравнений движения в (1) имеют вид

$$\theta|_{\zeta=0} = \theta_0 \in [0, 2\pi), \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \Delta,$$
(2)

где  $\Delta$  – нормированная расстройка синхронизма.

Рассмотрим динамику генератора состоящего из усилителя и линии задержки с коэффициентом обратной связи  $S$ . В этом случае уравнения (1) следует дополнить граничным условием для амплитуды поля:

$$a(\zeta = 0, \tau) = S \cdot a(\zeta = L, \tau - T),$$
(3)

где  $T$  – нормированное время задержки сигнала,  $L$  – нормированная длина области усиления.

Выберем для проведения моделирования нормированную длину системы  $L = 5$ , при которых коэффициент усиления в линейном режиме составляет около 28 дБ, а в режиме насыщения порядка 25 дБ. Величину времени запаздывания выберем равной  $T = 20$ . Известно, что в такой модели при увеличении величины обратной связи

<sup>1</sup> К сожалению, результаты данных исследований не были опубликованы в открытых источниках. В этой связи авторы выражают глубокую признательность д.ф.м.н., профессору А.И. Панасу, за раскрытие неизвестных ранее моментов истории шумотрона.

сначала происходит самовозбуждение на частоте одной из продольных мод кольцевого резонатора, затем стационарные колебания сменяются режимом периодической автомодуляции (Рис.2а) [12]. При дальнейшем увеличении коэффициента передачи происходит хаотизация колебаний, однако сохраняется большая неравномерность спектра, который фактически представляет собой набор изолированных линий с шумовым пьедесталом.

Как было указано выше, генерация сигналов со сплошным спектром возможна в шумотроне, представляющим собой ЛБВ, в цепь обратной связи которой включен нелинейный элемент, обладающий сильной зависимостью фазового набега от амплитуды падающей волны. При этом в качестве такого элемента используется ЛБВ, отстроенная от режима оптимального усиления. В работе [13] было показано, что модель двух связанных ЛБВ на основе уравнений (1) позволяет получить решения, соответствующие сплошному спектру генерации.

В ходе исследований было выдвинуто предположение, что функции усилителя и нелинейного элемента можно совместить при использовании ЛБВ с увеличенным значением параметра усиления Пирса. Это позволит увеличить коэффициент усиления, сохранив при этом сильную зависимость набега фазы от входной амплитуды. Моделирование системы уравнений (1) с граничными условиями (2),(3) подтвердило правильность такого предположения. При увеличении параметра Пирса и соответствующего увеличению нормированной длины до значения  $L = 20$ , по мере увеличения глубины обратной связи спектр излучения сначала носил линейчатый характер (Рис.1а). Однако при значении  $S \approx -10$  дБ происходил достаточно резкий переход к практически сплошному спектру (Рис.1б). Заметим, что по аналогии с реальными ЛБВ на входе ЛБВ вводились дополнительные поглощения на уровне -50 дБ, предотвращающие самовозбуждение из-за численных шумов.

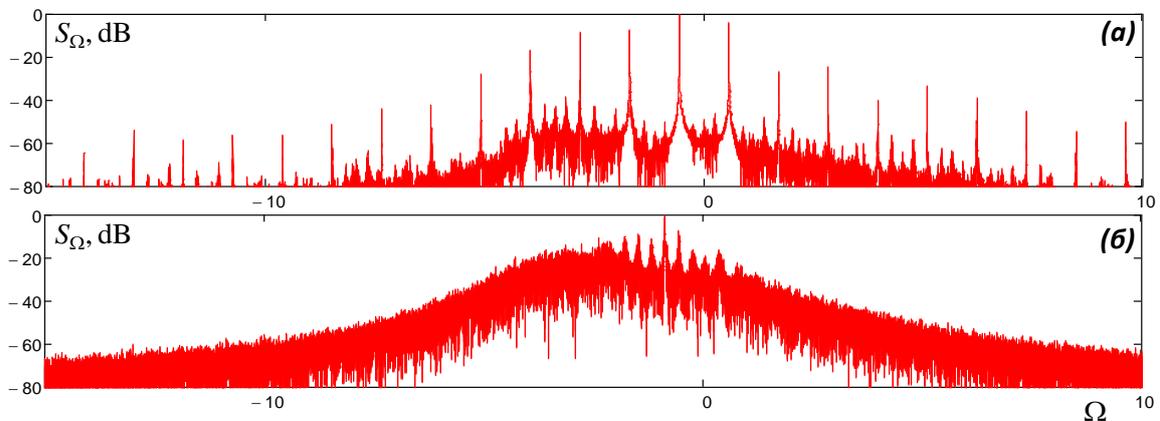


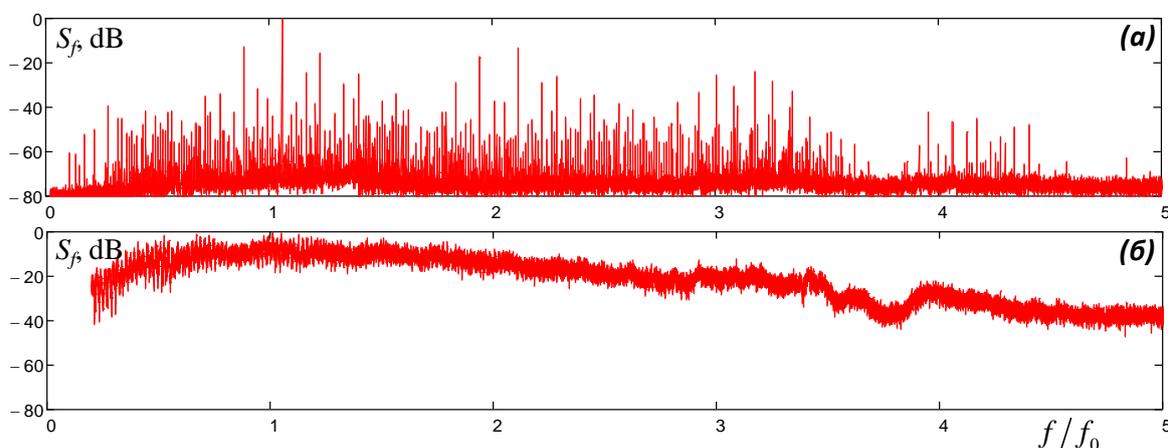
Рисунок 1. Спектр излучения в модели ЛБВ при значениях  $L = 20, T = 5$ :  
(а) - уровень обратной связи  $S = -50$  дБ; (б)  $S = -10$  дБ.

### 3. Экспериментальное исследование спиральной ЛБВ

Для исследований был выбран макет спиральной ЛБВО С-диапазона, имеющей достаточно высокое значение сопротивления связи замедляющей системы  $K \approx 40$  Ом. Коэффициент усиления в линейном режиме составлял 35-40 дБ, выходная мощность – порядка 10-15 Вт. В нормированных переменных длина пространства взаимодействия составила  $L \approx 20$ . Для получения нестационарных режимов генерации часть выходного сигнала отводилась и через регулируемый аттенюатор подавалась на вход лампы (Рис.4). Расчетная величины времени обратной связи при этом составила  $T \approx 5$ . Мощность выходного излучения измерялась калориметрической нагрузкой. Спектр излучения регистрировался спектроанализатором с шириной полосы 40 ГГц.

В области величин обратной связи  $S \leq -20$  дБ в системе устанавливались режимы

периодической и хаотической автомодуляции с линейчатым спектром (Рис.2а). Однако при дальнейшем увеличении обратной связи наблюдалась перестройка системы в режим генерации со сплошным спектром (Рис.5б). Неравномерность спектра при этом уменьшалась со значений порядка 50-60 дБ до значений 10-20 дБ. Интересно отметить, что в последнем случае ширина спектра на уровне -10 дБ составила около двух октав (Рис.2б). Интегральная мощность выходного излучения, регистрируемая calorиметрической нагрузкой, достигала 2 Вт.



**Рисунок 2.** Экспериментально измеренный спектр излучения ЛБВ:  
(а) - уровень обратной связи  $S = -30$  дБ; (б)  $S = -6$  дБ.

#### 4. Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность создания генераторов шумоподобного излучения со сплошным спектром на базе единичной ЛБВ с запаздывающей обратной связью. Учитывая универсальный характер системы уравнений (1), можно предположить, что аналогичные режимы могут быть получены и в более высокочастотных диапазонах. Это, очевидно, открывает новые перспективы исследований, учитывая что в настоящее время созданы ЛБВ с рабочими частотами более 1 ТГц [14,15].

Работа выполнена в рамках государственного задания (договор № 0035-2019-0001) и при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №19-08-00955.

#### Список литературы

1. Tarvainen O. et al. Electron heating with broadband microwave radiation: A new method for improving the performances of conventional B-minimum electron cyclotron resonance ion sources // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sect. B. – 2007. – V. 261. – No. 1-2. – P. 1044-1047.
2. Skalyga V. et al. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // Phys. Plasmas. – 2015. – V. 22. – P. 083509.
3. Samsonov S.V. et al. CW Ka-Band Kilowatt-Level Helical-Waveguide Gyro-TWT // IEEE Trans. Electron Dev. – 2012. – V. 59. – No. 8. – P. 2250-2255.
4. S. V. Samsonov et al. CW Operation of a W-Band High-Gain Helical-Waveguide Gyrotron Traveling-Wave Tube // IEEE Electron Dev. Lett. – 2020. – V. 41. – No. 5. – P. 773-776.
5. Генерация хаоса / Под общ. ред. Дмитриева А.С. – М.: Техносфера, 2012. - 424 с.
6. Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В. Генератор сверхвысокочастотных шумовых колебаний. А.с. 1053711 СССР. Заявка 0984513 от 08.06.1983 с приоритетом от 22.06.1967.
7. Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Е.В. Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. С. 1125735 СССР. Заявка 3523601 от 23.07.984 с приоритет от 22.06.1967.
8. 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. – С. 2160-2168.

9. Мясин Е.А. Исследования генерации СВЧ-шума в ИРЭ АН СССР 1962-1967 годов – начало нового научного направления. Лекция // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 22, № 1. – С. 104-122.
10. Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // Изв. ВУЗов. Радиопизика. – 1978. – Т. 21. – № 7. – С.1037-1052.
11. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 496 с.
12. Рыскин Н.М. Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью // Изв. ВУЗов. Радиопизика. – 2004. – Т. 47. – № 2. – С. 129-142.
13. Иванов А.А. и др. Возможности создания широкополосных хаотических генераторов на основе семейства импульсных ЛБВ W-диапазона // Изв. РАН. Сер. физическая. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 238-242.
14. Богомолова Е.А. и др. ЛБВ миллиметрового и терагерцового диапазонов: особенности конструкций замедляющих систем и технологий изготовления // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 3 (546). – С. 66-83.
15. Paoloni C. et al. Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2020. – P. 1-37.