

## ГЕНЕРАТОРЫ СТОХАСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЛОВ-КЛИНОТРОНЕ ДЛЯ СИСТЕМ СКРЫТНОЙ СВЯЗИ, РАДИОПРОТИВОДЕЙСТВИЯ И РАДИОМАСКИРОВКИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Б. П. Ефимов

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: jean@ire.kharkov.ua*

Описаны результаты экспериментальных исследований нескольких способов возбуждения шумовых колебаний на ЛОВ-клинотроне в миллиметровом диапазоне радиоволн. Приведены электрические режимы и характеристики шумовых сигналов в зависимости от ряда параметров колебательных систем. Сделан сравнительный анализ спектральных характеристик разработанных макетов в миллиметровом диапазоне. Ил. 11. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** ЛОВ-клинотрон, миллиметровый диапазон, электронный пучок, шумовые колебания, спектр излучения.

Системы радиосвязи, использующие для передачи сложные шумовые сигналы, обладают рядом важных преимуществ, обеспечивающих скрытность передачи информации за счет работы под шумами, возможность работы в одной полосе частот нескольких каналов радиосвязи на основе кодового разделения сигналов, большую скорость передачи информации, а также способность эффективной борьбы с сосредоточенными по спектру мешающими воздействиями различного происхождения. Кроме того, одновременно с передачей полезного сигнала создаются эффективные шумовые помехи. Проблема создания систем радиосвязи связана с формированием эффективно управляемых мощных стохастических колебаний в широком частотном диапазоне. Для этого предложено использовать модулированные стохастические сигналы как по мощности, так и по положению спектра. Особый интерес вызывают системы связи в новых более коротковолновых диапазонах, особенно в миллиметровом диапазоне. Для их функционирования необходимы источники широкополосных сигналов с управляемыми параметрами [1].

Для систем радиопротиводействия и радиомаскировки в шумовой радиолокации широко используются генераторы шума сантиметрового диапазона. В результате этих работ, проводимых в этом направлении с 1964 г., были выяснены некоторые пути построения прямошумовых приборов, использующих неустойчивость системы плазма - пучок, неустойчивость облака пространственного заряда при наличии флуктуаций в цепи обратной связи усилителей [2-3]. На сегодняшний день успешно осваивается диапазон миллиметровых волн. В связи с этим разработка генераторов шума в этом диапазоне также является задачей актуальной.

До настоящего времени продолжают интенсивные исследования процессов возбуждения стохастических колебаний (СК) в детермини-

рованных диссипативных структурах с глубокой нелинейностью [4-8] и поиск эффективных систем возбуждения шумов. Физические принципы возбуждения таких колебаний в электронно-волновых системах на ЛОВ и ЛБВ с внешней обратной связью и флуктуирующим нелинейным элементом разработаны достаточно подробно [3]. Выявлены и трудности, вызванные спецификой построения генераторов СК в миллиметровом диапазоне.

Целью настоящей работы являются исследования методов возбуждения СК как на объемных, так и на поверхностных волнах в системах со слабой и сильной резонансностью на основе ЛОВ-клинотрона и его модификаций с резонатором поверхностной волны (РПВ).

**1. Генератор шума на ЛОВ с РПВ с многослойным электронным потоком.** Исследуется новый прибор, являющийся генератором шума миллиметрового диапазона с высоким уровнем интегральной мощности излучения, с небольшими геометрическими размерами конструкции, с низкими стартовыми режимами возбуждения шумовых колебаний.

Сущность работы прибора заключается в обогащении электронного потока шумовыми компонентами волн пространственного заряда с последующим их усилением, используя механизм электронно-волнового взаимодействия, обладающего высоким коэффициентом усиления [9, 10]. Электронный поток конечного сечения разбивается на слои с разной скоростью и плотностью электронного тока и вбрасывается в резонатор медленных волн. Режим скольжения электронных слоев достигается за счет разных ускоряющих напряжений. Электронные слои располагаются над периодической структурой пропорционально возрастанию в них плотности тока. При этом каждый предыдущий слой оказывается в поле более "сильном", чем то, которое бы он создал один в колебательной системе. Это об-

стоятельность приводит к глубокой "перемодуляции" более нижних электронных пучков, прилегающих к замедляющей системе. Таким образом, электронные слои в поле резонатора являются нелинейными элементами, с помощью которых сигнал, возникающий в колебательной системе, превращается в шумовой. Вместо внешней цепи обратной связи, создающей неустойчивость системы с многими степенями свободы, используется РПВ.

Конструктивно прибор (см. рис. 1) состоит из двух корпусов 1 и 2, в которых размещаются электронно-оптические системы 3 и 4, представляющие собой диодные пушки, формирующие ленточные электронные потоки сечением  $5,0 \times 0,3 \text{ мм}^2$ . Фокусировка пучков осуществляется однородным магнитным полем с направлением силовых линий, совпадающих с направлением скоростей электронных потоков. Колебательная система прибора состоит из призматического резонатора 6 (отрезок прямоугольного волновода сечением  $5,5 \times 11,0 \text{ мм}^2$ ) и гребенчатой замедляющей системы 5 (период 0,5 мм, глубина резонатора 1,97 мм), закороченной узкими стенками волновода 6. Фланец 7 служит вакуумной защитой прибора. Для водяного охлаждения в корпусах 1 и 2 изготовлен канал 8, соединенный с наружными оливками. В пространство взаимодействия через окна в узких стенках волновода 6 вбрасываются встречные электронные пучки с разной скоростью и плотностью электронного тока, возбуждающие шумовые колебания в миллиметровом диапазоне. По волноводу 6 шумовые колебания поступают в нагрузку, либо излучаются в свободное пространство.

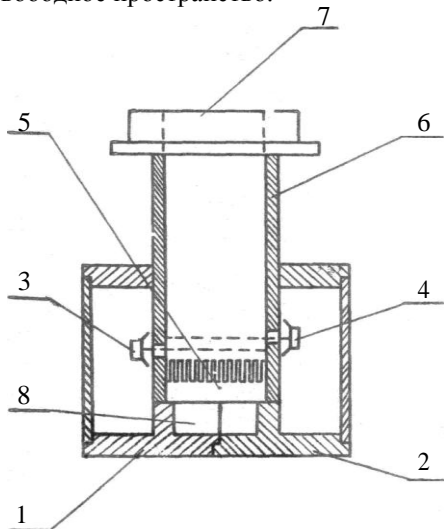


Рис. 1. Конструкция генератора шума на ЛОВ с РПВ

Схематически рис. 2 поясняет, как практически реализуется описанный механизм в системе решетка - многослойный пучок. Для простоты

рассмотрим взаимодействие только двух пучков 1 и 2 с полем решетки в предположении, что мощность пучка 2 больше мощности пучка 1. Из рис. 2 видно, что в этом случае менее мощный слой 1, дрейфует между периодической решеткой и слоем 2. Оказавшись в существенно более сильном поле, чем то, которое он может возбудить сам, он становится сильно перемодулированным. Взаимодействие такого луча с волной осуществляется в нелинейном режиме.

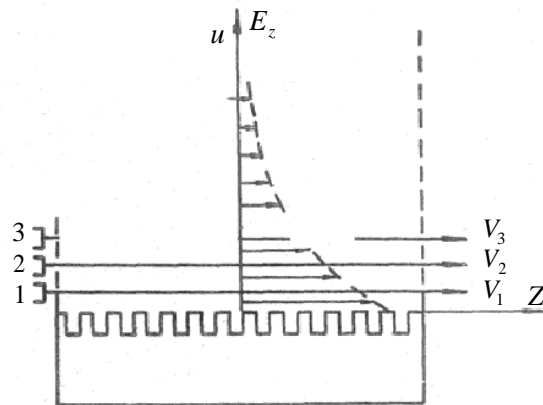


Рис. 2. Модель генератора шума с многослойным электронным потоком

Таким образом, картина образования шумового сигнала может быть представлена следующим образом. Уровень начальных шумов в пучке усиливается за счет электронно-волнового взаимодействия. Из шумового спектра выделяются собственные частоты колебательной системы, которые при  $GK_{oc} \geq 1$  ( $G$  - коэффициент усиления;  $K_{oc}$  - коэффициент обратной связи) не являются неустойчивыми, и под влиянием шумовых флуктуаций будут иметь место переходы, так как все состояния - равновероятны. Эти переходы носят случайный характер, и имеет место сложный закон амплитудной и фазовой модуляции. Нарастание шумовых колебаний до стационарного уровня ограничивается потерями в системе.

Нами проведено экспериментальное исследование генератора шума, изображенного на рис. 1. Шумовой сигнал 8-мм диапазона, излучаемый генератором, принимался анализатором спектра ИВ-66. Ускоряющие напряжения, подаваемые на аноды первой и второй пушек, равны 1650 и 1600 В. Анодные токи генератора регулировались изменением напряжения накала и в режиме генерации шумового сигнала составляли соответственно 40 и 25 мА. Фокусировка электронных пучков осуществлялась однородным магнитным полем с напряженностью  $H = 2500 \text{ Э}$ .

Исследуемый генератор мог работать в режиме возбуждения гармонического сигнала на

волне 8,6 мм с односкоростным потоком и в режиме шумового сигнала с многоскоростным электронным потоком. Измеренная с помощью анализатора спектра полоса шума составляла 20 МГц. Уровень интегральной мощности шумов ~ 0,5 Вт. Спектральная плотность шумов ~ 25 мВт/МГц. Общий вид спектра шумового излучения приведен на фотографии рис. 3.

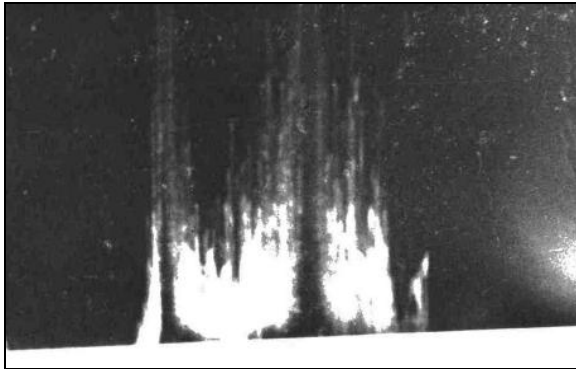


Рис. 3. Спектр шумового сигнала на выходе прибора

Анализ работы нового источника излучения СВЧ шумов показал возможность создания в миллиметровом диапазоне весьма перспективного генератора шума, интегральная мощность излучения которого близка к мощности насыщения гармонического сигнала. Относительно высокий КПД прибора позволяет надеяться на его перспективность также в субмиллиметровом диапазоне.

**2. Шумовые колебания в ЛОВ-клинодроне с лестничной структурой в режиме синхронизации электронного пучка с нулевой пространственной гармоникой.** Необходимым условием для построения шумотрона является наличие мощного широкополосного усилителя. К сожалению, в настоящее время в миллиметровом диапазоне длин волн усилители с соответствующими качествами не разработаны. Большую широкополосность имеют ЛБВ со спиральной замедляющей системой. Однако в миллиметровом диапазоне поперечные размеры спирали оказываются настолько малыми, что допустимо использование лишь тонких электронных пучков, вследствие чего мощность таких усилителей очень мала. Замедляющие системы, позволяющие использовать мощные электронные пучки, обычно обладают сильной дисперсией. Усилители с такими замедляющими системами оказываются узкополосными и плохо работают в схеме шумотрона. Ранее нами проводилось исследование работы ЛОВ с замедляющей системой гребенчатого типа в схеме с внешней петлей обратной связи. Было отмечено возбуждение многочастотного режима генерации. Наблюдался также шумовой режим, но он оказался чрезвычайно неустойчивым. Малые изменения парамет-

ров питания или нагрузки приводили к срыву шумового режима. В настоящем разделе приведены результаты разработки экспериментального генератора шума в 8-мм диапазоне на основе ЛОВ с замедляющей системой лестничного типа. В результате проведенных исследований показано, что в режиме синхронизма электронного потока с прямой волной в приборе с замедляющей системой лестничного типа возможно возбуждение устойчивого шумового режима.

Конструкция прибора схематически изображена на рис. 4. Прибор состоит из электронной пушки, замедляющей системы с двумя выводами энергии и коллектора. Корпус прибора и коллектор охлаждаются проточной водой. Диодная пушка формирует ленточный пучок сечением  $0,2 \times 4 \text{ мм}^2$ . Для фокусировки пучка используется продольное магнитное поле. Замедляющая система представляет собой волновод  $H$ -образного сечения, в который помещена периодическая структура лестничного типа. Размеры замедляющей системы в миллиметрах следующие (см. рис. 4,б): общая длина - 47; период  $T = 0,3$ ;  $d = 0,1$ ;  $l = 4$ ;  $L = 5$ ;  $B = 0,1$ ;  $W_1 = 0,25$ ;  $W_2 = 3,25$ ,  $h_1 = 2$ ;  $h_2 = 15$ . Выводы энергии представляют собой волноводы переменного сечения, связанные с концами замедляющей системы (при работе прибора в режиме ЛБВ). Для получения петли обратной связи оба вывода энергии соединились между собой волноводом. При построении схемы шумотрона нами не использовался отдельный нелинейный элемент в цепи обратной связи. Роль нелинейного элемента выполнял сам электронный прибор, поскольку фазовый сдвиг при прохождении сигнала через прибор сильно зависит от амплитуды и частоты сигнала.

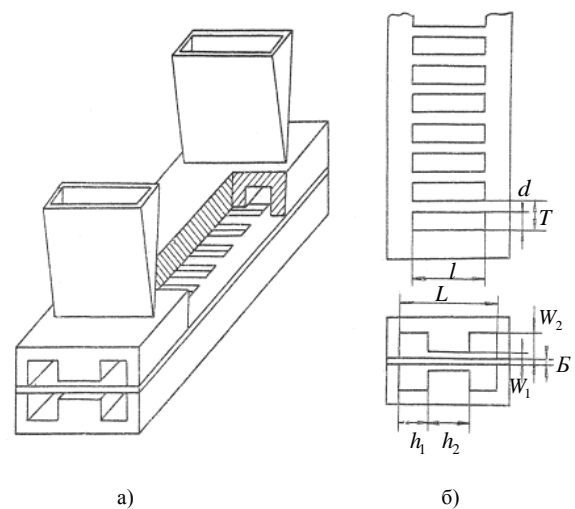


Рис.4. Конструкция генератора шума на ЛОВ с лестничной периодической структурой

На рис. 5 показана дисперсионная характеристика прибора в виде зависимости генерируемой длины волны от ускоряющего напряжения (кривая помечена кружками). Область вблизи значений напряжения  $U_{\pi}=1340$  В соответствует фазовому сдвигу на период структуры  $\varphi = \pi$ .

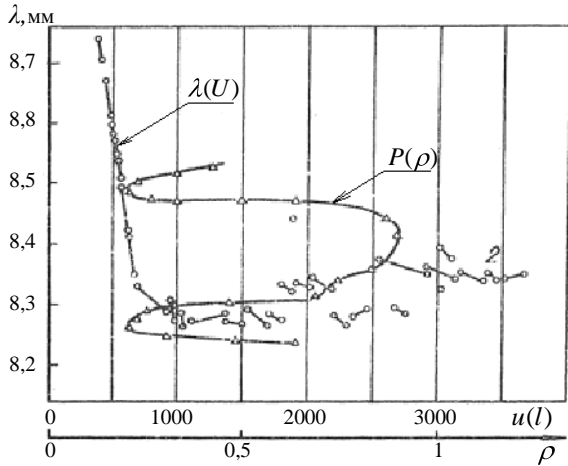


Рис. 5. Дисперсионная характеристика прибора

При напряжениях  $U < U_{\pi}$  осуществляется синхронизм электронного потока с -1-й пространственной гармоникой и прибор работает как ЛОВ. При  $U > U_{\pi}$  имеет место синхронизм с основной (нулевой) пространственной гармоникой и прибор работает как ЛБВ. При напряжениях  $U_{ш}=1670$  или  $U_{ш}=1680$  В в системе генерировался шумовой сигнал с полосой частот около 80 МГц и с интегральной мощностью порядка сотен милливатт (рис.6, б, г, е). При других значениях ускоряющего напряжения в системе устанавливался многочастотный режим или возбуждались монохроматические колебания (рис. 6, а, в, д). Области, в которых наблюдалась генерация, показаны на рис. 5.

Для возбуждения шумового режима необходимо обеспечить подачу мощного сигнала на вход ЛБВ по цепи обратной связи. Чтобы выполнить это условие, выходные волноводы должны быть достаточно хорошо согласованы с концами замедляющей системы. На рис. 5 показано изменение с частотой коэффициента отражения  $\rho$  от вывода у пушечного конца экспериментальной лампы при подсоединении к другому выводу энергии согласованной нагрузки. Видно, что наилучшее согласование, соответствующее минимальному коэффициенту отражения, получилось при  $\lambda \approx 8,27$  мм. Именно в этой области наблюдалось устойчивое возбуждение шумового режима.

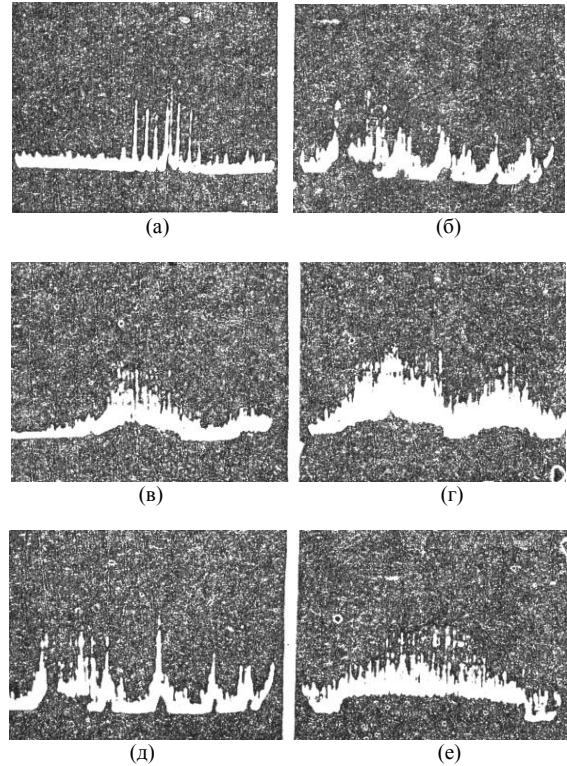


Рис. 6. Динамика превращения монохроматических колебаний в шумовые

Следует отметить, что для повышения эффективности взаимодействия электронного потока с поверхностной волной нам приходилось использовать клинотронный режим работы прибора, когда параллельность пучка и замедляющей системы слегка нарушалась, и пучок частично рассеивался на замедляющей системе. Вследствие этого накладывались ограничения на ток пучка, поскольку возможно оплавление и разрушение замедляющей системы. Рабочий ток не превышал 70 мА.

**3. Возбуждение стохастических колебаний в миллиметровом диапазоне путём синхронизации автоколебаний резонанной ЛОВ внешним стохастическим сигналом 3-см диапазона волн.** Экспериментально был исследован один из перспективных методов возбуждения стохастических колебаний в миллиметровом диапазоне волн путём синхронизации автоколебаний резонансной ЛОВО узкополосным стохастическим сигналом 3-см диапазона.

Экспериментальный макет (рис. 7) представлял собой две последовательно расположенные секции суммарной длиной до 50 мм, возбуждаемые общим ленточным электронным потоком. Первая секция служит для модуляции элек-

тронного потока 3-см стохастическим сигналом. Она выполнена в виде резонансной ЛОВО, периодическая структура которой для исключения одновременного возбуждения обеих секций удалась от оси прибора (на рис. 7 - вниз). Выходной секцией служила резонансная ЛОВО-клинотрон миллиметрового диапазона, работающая в режиме синхронизации генерируемых ею колебаний по электронному потоку. Для этого соответствующим расчётам дисперсионных характеристик периодических структур, выполненных в виде гребёнок в волноводе, была обеспечена работа обеих секций в заданных диапазонах при одинаковых ускоряющих напряжениях. Для исключения взаимного влияния электронный поток проходил из модулирующей секции в выходную через запредельное отверстие, обеспечивающее затухание мощности миллиметровых колебаний не менее 20 дБ.

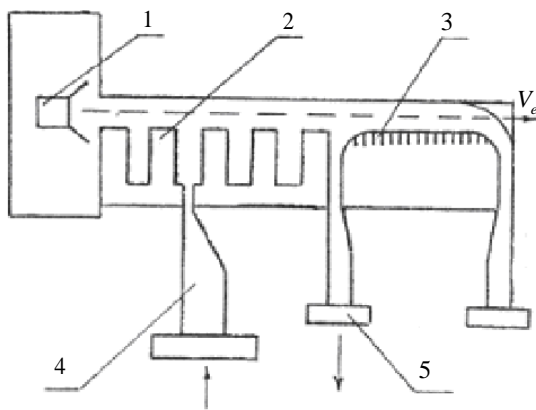


Рис. 7. Макет 2-х каскадного генератора: 1 - электронная пушка; 2 - первая секция; 3 - вторая секция; 4 - подвод СВЧ энергии; 5 - вывод СВЧ энергии

Соответствующей юстировкой макета в постоянном магнитном поле можно было поочередно возбуждать автоколебания в обеих секциях. Это позволило экспериментально снять их дисперсионные характеристики, которые приведены на рис. 8. Видно, что необходимые для синхронизации условия с достаточной точностью выполняются в окрестностях ускоряющих напряжений 2,2 и 3,1 кВ. Приведенная на этом же рисунке зависимость КСВ входного устройства модулирующей секции от длины волны показывает, что наиболее эффективный ввод модулирующего сигнала будет на частотах, соответствующих ускоряющему напряжению порядка 2,2 кВ (КСВ имеет минимум). Кроме этого, при данном напряжении фазовый набег поля на од-

ной ячейке периодической структуры примерно равен  $0,5 \cdot \pi$ , что обеспечивает, как показывает эксперимент, наиболее эффективное взаимодействие электромагнитного поля 8-мм секции с электронным потоком.

Широкополосные стохастические колебания 3-см диапазона получали с помощью мало мощного шумотрона. Так как модулирующая секция макета узкополосная, то для повышения спектральной плотности модулирующего сигнала колебания шумотрона подавались на полосовой фильтр (полоса пропускания на уровне 3 дБ, что составляет 0,4% от средней частоты) и усиливались мощной ЛБВО в режиме максимального КПД. Наблюдалось преобразование спектральных характеристик усиливаемого узкополосного стохастического сигнала [11].

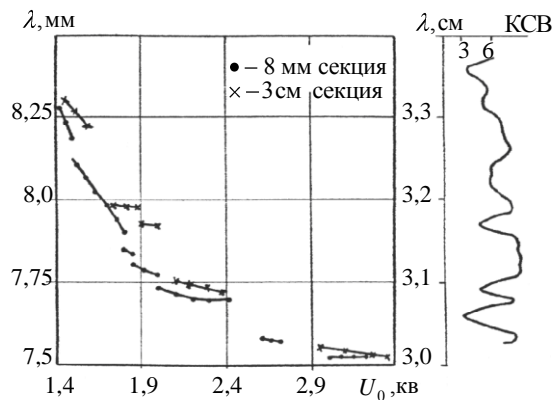
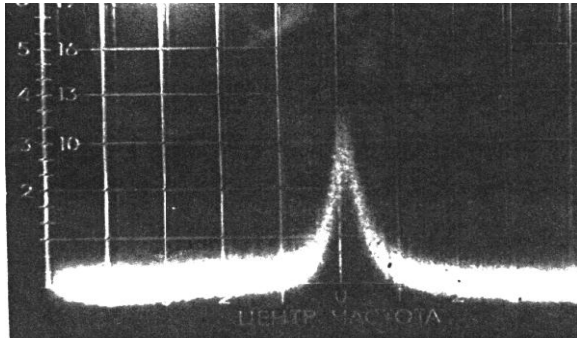


Рис. 8. Дисперсионные характеристики 3-см и 8-мм секций. Зависимость КСВ входного устройства модулирующей секции от длины волны

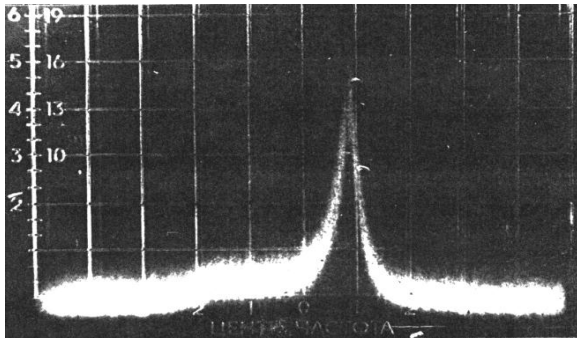
Измерительная схема позволяла определять интегральные мощности модулирующего сигнала и синхронизированных колебаний 8-мм ЛОВ-клинотрона. С помощью панорамного анализатора спектра С4-60 измерялись спектральные характеристики стохастических колебаний. Постоянная времени входных цепей анализатора спектра делалась сравнительно большой, поэтому наблюдаемые спектры фактически являются огибающей стохастического процесса. Масштаб одного деления развёртки анализатора составлял 0,13% от средней частоты. Результаты исследований динамики спектра колебаний представлены на рис. 9.

Фотографии спектров (рис. 9), иллюстрируют трансформацию спектра синхронизированных колебаний 8-мм генератора с ростом тока пучка при фиксированном уровне модулирующего сигнала. При повышенных значениях

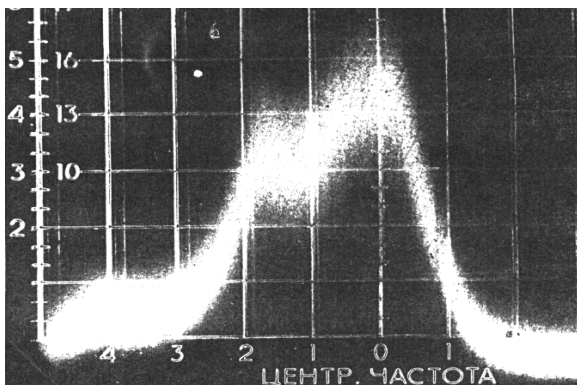
рабочего тока происходит существенное расширение спектра колебаний. Одновременно увеличивается мощность 8-мм колебаний, так как происходит более эффективное взаимодействие узкополосного сигнала с электронным пучком в результате его дополнительного усиления в модулирующей секции.



а)



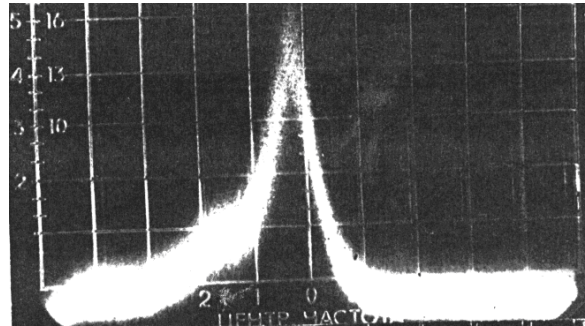
б)



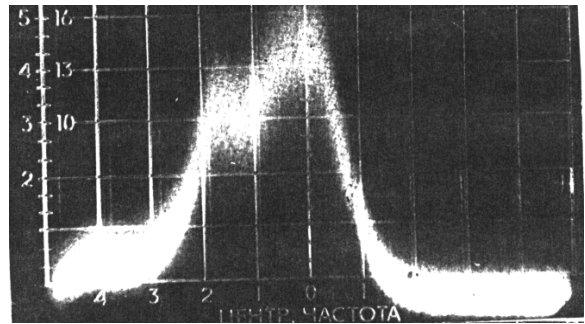
в)

Рис. 9. Динамика изменения спектра колебаний с ростом тока в пучке:  $P_M=0,19$ ; а) -  $I_0/I_{cm}=1,3$ ; б) -  $I_0/I_{cm}=1,6$ ; в) -  $I_0/I_{cm}=3$

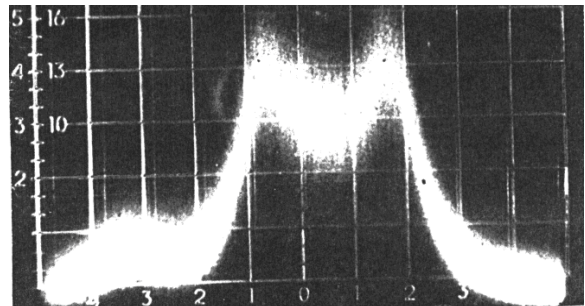
На рис. 10 показано, к чему приводит увеличение уровня модулирующего сигнала при фиксированном большом значении тока пучка. Спектр колебаний заметно расширяется, однако, интегральная мощность выходного сигнала несколько снижается.



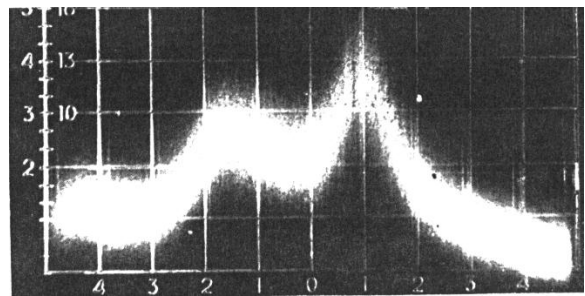
а)



б)



в)



г)

Рис. 10. Трансформация спектра колебаний с увеличением мощности накачки:  $I_0/I_{cm}=3$ ; а) -  $P_M=0,1$ ; б) -  $P_M=0,19$ ; в) -  $P_M=0,52$ ; г) -  $P_M=1,0$

Зависимость ширины спектра выходных колебаний по отношению к средней частоте  $\Delta f / f_0$  и мощности 8-мм стохастических колебаний ЛОВ  $P_8$  от мощности модулирующего сигнала  $P_M$  при различных токах пучка приведены на рис. 11.

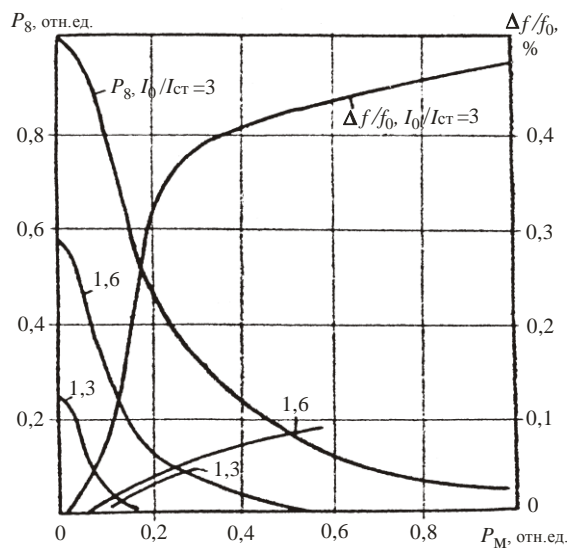


Рис. 11. Зависимость ширины спектра выходных колебаний по отношению к средней частоте  $\Delta f/f_0$  и мощности миллиметровых колебаний  $P_8$  от мощности модулирующего сигнала  $P_M$  при различных токах пучка  $I_0/I_{ст}$

При больших рабочих токах пучка ширина спектра выходных колебаний в несколько раз превышает ширину спектра модулирующего сигнала. В первую очередь это связано с тем, что четвертая гармоника тока пучка, возникающая в результате модуляции и нелинейного усиления входного стохастического сигнала, имеет абсолютную величину ширины спектра в четыре раза большую, чем основная гармоника. Кроме того, к расширению спектра выходного сигнала приводит его трансформация на нелинейной характеристике 8-мм секции. Отметим, что максимальная ширина спектра синхронизированных миллиметровых колебаний значительно превышает полосу синхронизации резонансной ЛОВО монохроматическим сигналом.

Уменьшение выходной мощности с ростом  $P_M$  характерно для работы автогенераторов в режиме синхронизации обертоном внешних колебаний. Кроме того, имеется ещё один механизм уменьшения мощности миллиметровых колебаний [12] - это увеличение разброса скоростей электронов пучка на входе миллиметровой ЛОВ в результате его предварительной модуляции стохастическим сигналом. В итоге, при значениях  $P_M$ , больших 0,8, автоколебания выходной секции практически подавлены, и наступает менее эффективный режим умножения частоты.

Отметим, что существенное расширение спектра 8-мм стохастических колебаний и увеличение их интегральной мощности до мощности автоколебаний ЛОВ следует ожидать при работе выходной секции в более нелинейном режиме, чем удалось реализовать в данной работе. В этом

случае режим синхронизации сменяется более эффективным режимом стохастической автомодуляции, возникающим в автоколебательных системах, работающих при внешнем воздействии сигнала большой амплитуды [13].

**Выводы.** Таким образом, рассмотрены многопучковые нелинейные структуры на основе РПВ с запаздыванием реакции системы на начало действия нелинейности по быстрой волне. Показано, что сценарии перехода от порядка к хаосу имеют универсальный характер и вызваны эффектами перегруппировки электронов в поле волны большой амплитуды.

Приведены результаты исследований генератора стохастических колебаний миллиметрового диапазона, в основу которого положено явление умножения спектральных составляющих внешнего стохастического модулирующего сигнала при взаимодействии с электронным потоком. Генератор СК содержит две секции: первая является модулятором, а вторая работает в режиме синхронизации 8-мм колебаний по электронному потоку. Показана возможность получения стохастических колебаний в миллиметровом диапазоне с полосой 300 МГц и мощностью порядка автоколебаний.

Исследованы шумовые колебания в ЛОВ-клинотроне с лестничной структурой в режиме синхронизации электронного пучка с нулевой пространственной гармоникой

Полученные экспериментальные результаты показывают принципиальную возможность разработки шумотронов в миллиметровом диапазоне длин волн [14-15].

Предполагается проводить дальнейшие исследования с целью расширения полосы частот генерируемого шумового сигнала и повышения его мощности. Одним из путей повышения мощности является использование нескольких пучков и нескольких лестничных систем, расположенных параллельно друг другу. Улучшение фокусировки электронного пучка позволит увеличить ток а также повысить генерируемую мощность. Перспективным может оказаться использование приборов с замедляющей системой гребенчатого типа при работе в режиме синхронизма с прямыми гармониками. На гребенчатых замедляющих системах допустимо рассеивание электронных пучков значительной мощности, благодаря чему в приборах с замедляющими системами такого типа в миллиметровом диапазоне возможна генерация сигналов с мощностью порядка десятков ватт.

В исследовании способов возбуждения стохастических сигналов и разработках генераторов шума ММД принимали участие Б. Я. Кривицкий, М. В. Мильчо, В. А. Ракитянский, А. П. Попов.

1. Быстров Р. П., Меркин А. А., Хлопов Г. И., Шестопалов В. П. Активные радиолокационные системы обнаружения наземных объектов с передачей информации // Электронные волны и электронные системы. - 1997. - 2, №3. - С.75-77.
2. Афанасьев В. В., Трубецков Д. И. Динамический хаос в электронных сверхвысоко-частотных приборах // Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1991. - 3, №1, - С.15-21.
3. Кислов В. Я. Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронно-волновых системах и автогенераторах с запаздыванием // Лекции по электронике ВЧ и радиофизике. 5-я зимняя школа-семинар инженеров. - Кн. 5. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1981. - С.78-117.
4. Кузнецов С. П. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Радиофизика. - 1982. - 25, №12, - С.1410-1428.
5. Безруко Б. П., Булгакова Л. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. - Кн. 5. - Саратов: Изд-во СГУ, 1980. - С.25-77.
6. Безруко Б. П., Булгакова Л. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. Стохастические авто колебания и неустойчивость в лампе обратной волны // Радиотехника и электроника. - 1983. - 28, №6. - С.1136-1139.
7. Дмитриев А. С., Кислов В. Я. Стохастические колебания в автогенераторе с инерционным запаздыванием первого порядка // Радиотехника и электроника. - 1984. - 29, №12. - С.2389-2398.
8. Дмитриев А. С., Кислов В. Я., Спири А. Г. Хаотические колебания в неавтономном генераторе с реактивной нелинейностью // Радиотехника и электроника. - 1983. - 28, №12. - С.2430-2439.
9. Шевчик В. И., Шведов Г. Й., Соболева А. В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. - Изд-во Саратовского университета. - 1962. - 373 с.
10. Лопухин В. М., Рошаль А. С. Электроннолучевые параметрические усилители. - М.: Сов. радио, 1968. - 240 с.
11. Ефимов Б. П., Ракитянский В. А., Шестопалов В. П. Усиление узкополосных стохастических сигналов широкополосной ЛБВО // Письма в Журн. техн. физики. - 1985. - 11, №12. - С.729-733.
12. Chang N. C., Slaw A. W., Watkins D. A. // IRE Trans. - 1959. - 6, №4. - 437 p.
13. Гапонов А. В., Рабинович М. И., Шапиро М. Ф. Возможный механизм стохастизации пульсаций интенсивности излучения ОКГ // Вест. Моск. ун-та. Сер. Физика. Астрономия. - 1978. - 19, №4. - С.125-136.
14. Yefimov B. P., Rakityansky V. A., Kulemin G. P. Noise generators of MM-band radiowaves at Backward wave oscillators //

Int. J. Infrared and Millimeter Waves. - 1999. - 20, №9. - P.37-41.

15. Кивва Ф. В., Ефимов Б. П., Ракитянский В. А., Мильчо М. В. Генераторы стохастических колебаний для систем скрытой связи мм-диапазона радиоволн / Труды 3-й Межд. конф. и выставки «Спутниковая связь». - Москва. 1998. - С.127-130.

## STOCHASTIC OSCILLATOR ON BWT-CLINOTRON FOR HIDDEN COMMUNICATION SYSTEMS, ELECTRONIC COUNTER MEASURE AND RADIOMASKING IN MILLIMETER RANGE

B. P. Yefimov

The experimental results of different ways of an excitation of noise radiation in BWT-Clinotron in mm range are described in this paper. The electrical regimes and characteristics of noise radiation depending on several parameters of oscillating system are given. There is comparative analysis of spectral characteristics of developed devices in millimeter wave range.

**Key-words:** BWT-clinotron, millimeter range, electron beam, noise radiation, radiation spectrum.

## ГЕНЕРАТОРИ СТОХАСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ НА ЛЗХ-КЛІНОТРОНІ ДЛЯ СИСТЕМ СКРИТНОГО ЗВ'ЯЗКУ, РАДІОПРОТИДІЇ ТА РАДІОМАСКУВАННЯ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Б. П. Єфімов

В роботі описані результати експериментальних досліджень декількох шляхів збудження шумових коливань на ЛЗХ-кліноτροні у міліметровому діапазоні радіохвиль. Наведені електричні режими та характеристики шумових сигналів у залежності від ряду параметрів коливальних систем. Зроблено порівняльний аналіз спектральних характеристик розроблених макетів в міліметровому діапазоні.

**Ключові слова:** ЛЗХ-кліноτροн, міліметровий діапазон, електронний пучок, шумові коливання, спектр випромінювання.

Рукопись поступила 7 декабря 2006 г.