



## ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СВЧ-ДИАПАЗОНА В ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЕ «ЛАМПА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ С КОЛЛЕКТОРОМ-ГЕНЕРАТОРОМ»

*А.В. Муштаков*

Предложен и экспериментально исследован новый гибридный электровакуумный прибор диапазона сверхвысоких частот на основе широкополосного СВЧ-усилителя – лампы бегущей волны, включающего в качестве одного из элементов многоступенчатый коллектор-генератор с возможностью формирования в его пространстве виртуального катода за счет торможения пучка электронов, выходящих из пространства взаимодействия ЛБВ. Показано, что такой прибор позволяет генерировать и усиливать широкополосные хаотические сигналы сантиметрового диапазона длин волн с шириной полосы одна-две октавы со слабой изрезанностью спектра мощности генерации. Определены характеристики генерируемых хаотических сигналов (спектральный состав и интегральная мощность) в различных режимах работы гибридного прибора.

### Введение

Электронно-волновые системы, в которых в качестве активной среды используется электронный пучок с виртуальным катодом (ВК), представляются в настоящее время одним из перспективных источников сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения среднего и высокого уровня мощности [1–5].

В работах [5–8] предложен и детально исследован генератор широкополосного шумоподобного сигнала на основе электронного пучка с виртуальным катодом, формирующимся в тормозящем статическом поле, так называемый низковольтный виркатор. Предложенные технические решения низковольтного виркатора защищены патентами РФ [9–13]. Принцип функционирования генератора заключается в том, что нерелятивистский интенсивный электронный пучок инжектируется в пространство взаимодействия с тормозящим потенциалом. В результате этого в электронном пучке возникает виртуальный катод, колебания которого регистрируются широкополосной электродинамической системой. Подобный генератор способен демонстрировать различные режимы – от генерации монохроматического сигнала до генерации хаотических сигналов с шириной полосы частот до двух октав [6, 7, 14]. Однако уровень выходной СВЧ-мощности такого генератора достаточно низкий [15]. В экспериментальном макете низковольтного виркатора при токе пучка  $I_0 = 100 \dots 300$  мА

и ускоряющем напряжении  $V_0 = 1...3$  кВ были обнаружены СВЧ-колебания в диапазоне  $1...5$  ГГц с мощностью порядка  $0.2...1.0$  Вт при электронном КПД, не превышающем несколько процентов.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования нового «гибридного» прибора СВЧ на основе широкополосного СВЧ-усилителя – лампы бегущей волны (ЛБВ), включающего в качестве одного из элементов многоступенчатый коллектор с возможностью формирования в его пространстве виртуального катода за счет торможения пучка электронов, выходящих из пространства взаимодействия ЛБВ. Новый прибор обладает высокой мощностью, достижимой в ЛБВ, наряду с возможностями низковольтного виркатора в различных режимах колебаний, включая режимы широкополосной хаотической генерации со слабой изрезанностью спектра мощности в диапазоне частот более октавы.

### 1. Схема прибора

На рис. 1 представлены конструктивные элементы и блок-схема предложенного многофункционального СВЧ-прибора на основе широкополосного электронного усилителя с коллектором-генератором. Прибор состоит из нескольких основных

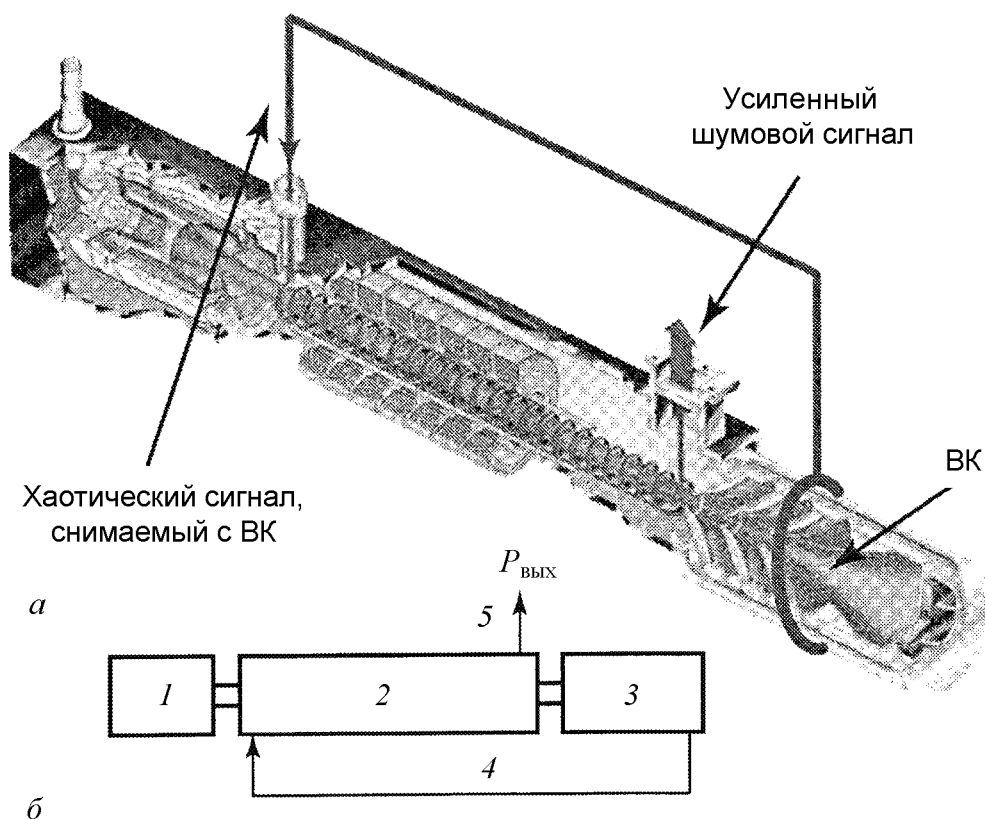


Рис. 1. *а* – Внешний вид генератора широкополосных хаотических колебаний СВЧ-диапазона на основе гибридной системы «лампа бегущей волны с коллектором-генератором». *б* – Блок-схема гибридного многофункционального прибора: 1 – источник электронов (электронная пушка), 2 – мощный широкополосный усилитель СВЧ-сигнала, 3 – коллектор-генератор, 4 – элемент связи, 5 – вывод усиленного СВЧ-сигнала

функциональных модулей – источника электронов (электронной пушки) 1, мощного широкополосного усилителя СВЧ-сигнала 2, коллектора-генератора 3 и элемента связи 4. Усилительный модуль прибора (ЛБВ) содержит источник электронов 1, формирующий электронный пучок с током  $I_0$ , который попадает в пространство взаимодействия 2. Пространство взаимодействия представляет собой отрезок электродинамической замедляющей системы, в котором происходит взаимодействие электронного потока с синхронной электромагнитной волной, за счет чего имеет место усиление СВЧ-сигнала; одновременно электроны пучка теряют часть своей кинетической энергии [3]. Далее отработанный пучок на выходе из замедляющей системы попадает в область многоступенчатого коллектора электронов 3, совмещающего функции генератора СВЧ-сигналов на основе ВК (низковольтного виркатора). СВЧ-сигнал, снимаемый в коллекторе-генераторе с помощью широкополосного элемента связи 4 (отрезок спирали или диафрагма, нагруженные на коаксиальную линию), попадает на вход усилительного модуля (ЛБВ) и, усиливаясь в ЛБВ до мощности  $P_{\text{вых}}$ , выводится через элемент вывода энергии 5 в нагрузку.

Таким образом, мы получаем комбинированный многофункциональный вакуумный СВЧ-прибор, в котором с помощью одного электронного пучка осуществляется генерация и усиление СВЧ-сигналов с различным спектральным составом и мощностью. Отметим, что в рассматриваемом устройстве отсутствует как таковая цепь *обратной* связи, что позволяет создать генератор СВЧ-сигналов с возможностью перестройки режимов генерации от монохроматического до широкополосного шумоподобного сигнала с малой изрезанностью спектра и шириной полосы частот в одну-две октавы. Малая изрезанность спектра и широкая полоса генерируемых частот связана с отсутствием строгих фазовых условий, определяемых цепью запаздывающей обратной связи, как это имеет место в источниках хаотического сигнала типа ЛБВ с обратной связью (шумотронов), в которых связываются цепью обратной связи непосредственно выход и вход ЛБВ, в результате чего система

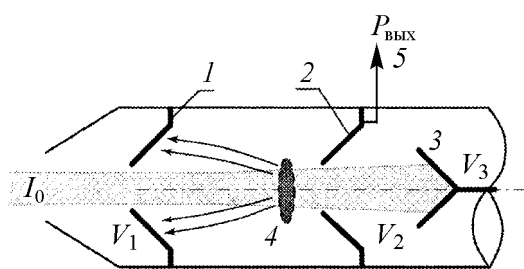


Рис. 2. Схема трехступенчатого коллектора-генератора ЛБВ: 1–3 – секции коллектора-рекуператора с потенциалами  $V_{1,2,3}$ , 4 – схематичное изображение образующегося в пучке ВК, 5 – широкополосный вывод энергии СВЧ-колебаний из коллектора-рекуператора

превращается в распределенный резонатор [16–17]. Источником СВЧ-колебаний в предложенной системе на основе ЛБВ с коллектором-генератором служит нестационарный виртуальный катод, формируемый в коллекторе-рекуператоре со специально предусмотренным широкополосным выводом энергии. Управление режимами колебаний ВК возможно путем изменения тормозящего потенциала на ступенях коллектора.

На рис. 2 представлена схема используемого в нашем эксперименте коллектора-генератора ЛБВ. Отработанный в пространстве взаимодействия ЛБВ электронный пучок с током  $I_0$  попадает в область трехступенчатого коллектора. На первую секцию коллектора-рекуператора подается потенциал  $V_1 < V_0$  ( $V_0$  – ускоряющий потенциал электронов пучка); на вторую – потенциал  $V_2 < V_1$ ; на третью – потенциал  $V_3 < V_2$ . Образующийся в коллекторе виртуальный катод в зависимости от соотношения потенциалов секций

коллектора может возникнуть как во второй, так и в третьей секциях коллектора. Для вывода мощности в рассматриваемой в статье конструкции коллектора-генератора используется коаксиальная линия, подключенная к диафрагме второй секции коллектора.

Рассмотрим кратко принцип действия многофункционального прибора «электронный усилитель (ЛБВ) с коллектором-генератором». Отработанный в ЛБВ электронный пучок с большим разбросом по скоростям попадает в пространство взаимодействия коллектора-генератора. Далее, в коллекторе-генераторе отработанный электронный пучок попадает в область тормозящего поля, образованного разностью потенциалов  $V_1 - V_3$  ( $V_3 \leq V_2 \leq V_1$ ), в результате чего в пучке формируется нестационарный ВК [6] (см. также [7], где обсуждается формирование и нестационарные колебания ВК в пучке с большим разбросом электронов по скоростям, как это имеет место в ЛБВ). Пространственно-временные колебания ВК регистрируются отрезком широкополосной электродинамической системы коллектора-генератора. Характер колебаний изменяется от одночастотных и многочастотных до шумоподобных, в зависимости от соотношения потенциалов  $V_{1,2,3}$  секций коллектора. При этом, как было показано в работе [7], значительный разброс электронов пучка по скоростям, который имеет место за счет группирования и взаимодействия пучка с синхронной электромагнитной волной в ЛБВ, позволяет значительно улучшить характеристики СВЧ-сигнала в режиме хаотической генерации, то есть ширина полосы частот генерируемых колебаний расширяется, а изрезанность спектра мощности хаотического сигнала уменьшается.

СВЧ-сигнал колебаний ВК, снимаемый с коллектора-генератора, через элемент вывода энергии и элемент связи поступает на вход ЛБВ, где происходит его усиление. Усиленный хаотический широкополосный сигнал выводится из комбинированного прибора с выхода ЛБВ в полезную нагрузку. За счет такой схемы имеется возможность значительно увеличить выходную мощность данного комбинированного прибора ЛБВ с коллектором-генератором по сравнению с низковольтным виркаторм при использовании тех же токов пучка и ускоряющих напряжений [5, 6, 15].

## **2. Результаты исследований генерации и усиления широкополосных хаотических сигналов в комбинированной системе ЛБВ с коллектором-генератором**

Рассмотрим результаты экспериментального исследования генерации и усиления широкополосного хаотического сигнала в электронно-волновой системе «ЛБВ-усилитель с коллектором-генератором». В качестве исследуемой ЛБВ использовались пакетированные спиральные ЛБВ сантиметрового диапазона длин волн (рабочая полоса частот 1...2 ГГц) с трехступенчатым электростатическим коллектором. Основные характеристики ЛБВ следующие. Ускоряющее напряжение  $V_0 = 2...2.5$  кВ, ток пучка  $I_0 = 100...150$  мА. Коэффициент усиления в одночастотном режиме составляет  $K_y = 40...45$  дБ, выходная мощность  $P_{\text{вых}} = 40...55$  Вт, электронный КПД  $\eta_e = 22...24$  %, технический КПД  $\eta_T = 35...42$  %. Рассматривались ЛБВ с положительной дисперсией замедляющей системы (+6 %) и с отрицательной (-4 %).

Для анализа широкополосных хаотических сигналов, генерируемых в системе, использовался высокочастотный анализатор спектра Agilent ESA E4402B (диапазон частот от 10 кГц до 3 ГГц) и ваттметр поглощаемой мощности МЗ-51. Для анализа также использовались высокодобротные (полоса частот 2...4 МГц) фильтры с записью детектируемого сигнала с помощью ЭПП-09. Это позволяло определить спектральную плотность мощности шума колебаний, генерируемых электронным пучком с виртуальным катодом в коллекторе-генераторе и усиливаемых широкополосной ЛБВ среднего уровня мощности.

Соответствующие спектры колебаний в пучке с виртуальным катодом, регистрируемые на выходе коллектора-генератора, в статическом и динамическом режимах работы ЛБВ показаны на рис. 3. Под статическим режимом работы ЛБВ понимается режим, когда на вход ЛБВ не подается входной сигнал для усиления, и соответственно отсутствует разброс электронов по скоростям на выходе из замедляющей системы – на входе коллектора-генератора. В динамическом режиме работы на вход ЛБВ-усилителя подается для усиления СВЧ-сигнал, генерируемый коллектором-генератором. В этом случае разброс по скоростям электронов на входе в коллектор-генератор достаточно велик.

Спектры на рис. 3, *а*, *б* получены по сигналу, снятому с выхода коллектора-генератора в статическом режиме, на рис. 3, *в*, *г* – в динамическом режиме работы ЛБВ. Рис. 3, *а* и *в* построены при малых тормозящих потенциалах на ступенях кол-

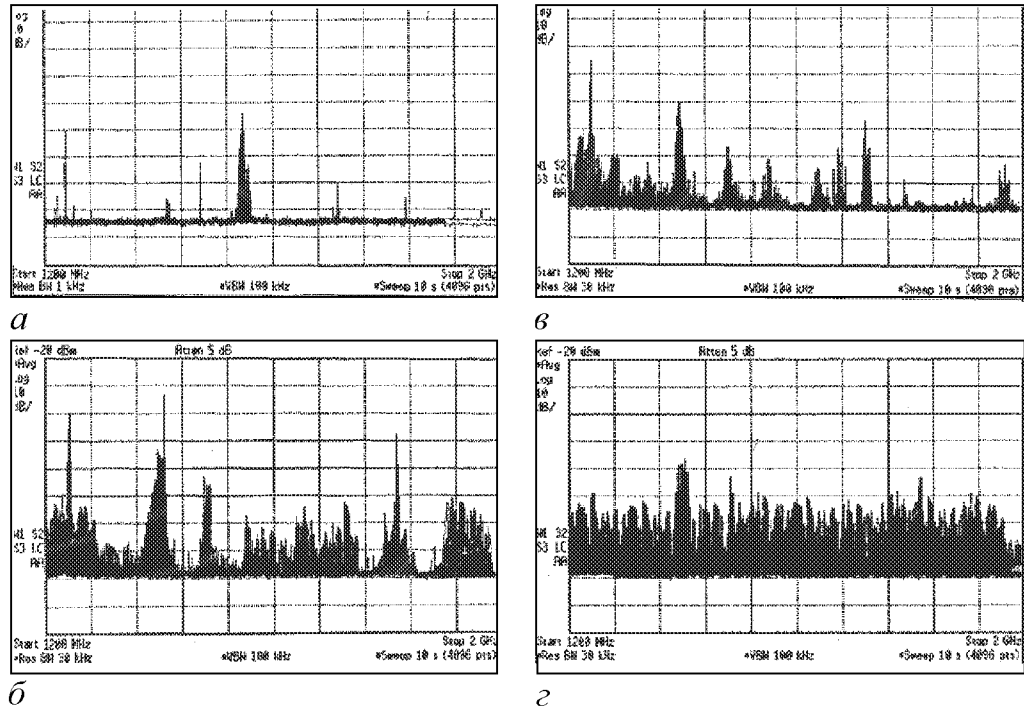


Рис. 3. Спектры регистрируемых колебаний в коллекторе-генераторе в статическом режиме работы ЛБВ при потенциалах коллектора  $V_1/V_0 = 0.7$ ,  $V_2/V_0 = 0.5$ : *а* –  $V_3/V_0 = 0.45$ ; *б* –  $V_3/V_2 = 0.25$ ; в динамическом режиме работы при  $V_1/V_2 = 0.7$ ,  $V_2/V_0 = 0.5$ : *в* –  $V_3/V_0 = 0.7$ ; *г* –  $V_3/V_0 = 0.6$ . Диапазон частот, представленный на спектрах, равен 1200...2000 МГц

лектора, рис. 3, б и в – при большом торможении пучка в коллекторе. Видно, что при малом торможении в статическом режиме работы ЛБВ наблюдается генерация, близкая к одночастотному сигналу (см. рис. 3, а). С увеличением торможения электронов в коллекторе или увеличением разброса электронов по скоростям (динамический режим работы ЛБВ) СВЧ-колебания ВК в коллекторе-генераторе начинают характеризоваться многочастотным хаотическим спектром генерации (см. рис. 3, б–в). Однако в динамическом режиме работы ЛБВ, который характеризуется значительным разбросом электронов по скоростям на входе в коллектор-генератор, генерируемый сигнал демонстрирует сплошной спектр в полосе частот  $\Delta f > 1$  ГГц и существенно меньшую изрезанность  $N = P_{\text{макс}}/P_{\text{мин}}$  в рабочей полосе частот ( $P_{\text{макс}}$  и  $P_{\text{мин}}$  – максимальная и минимальная спектральные мощности в рассматриваемой полосе частот генерации). Последнее показывает, что, изменяя тормозящие потенциалы, подаваемые на ступени коллектора, можно управлять не только мощностью генерируемых колебаний, но и их спектральным составом.

На рис. 4 показаны зависимости от потенциала на второй ступени коллектора выходной мощности и КПД (электронного  $\eta_e$  и технического  $\eta_T$ ) многофункционального прибора, измеренные по характеристикам, снимаемым с выхода ЛБВ-усилителя с нормальной дисперсией замедляющей системы, которые позволяют продемонстрировать преимущества конструкции предложенного многофункционального прибора. Таким образом, на рис. 4 показаны характеристики всего прибора в целом, а не только коллектора-генератора, как на предыдущих рисунках. Видно, что интегральная мощность  $P_{\text{вых}}$  широкополосных хаотических колебаний, регистрируемых в коллекторе-генераторе, усиливается более чем в сто раз, достигая 50 Вт, что составляет усиление по мощности около 30 дБ. При этом технический КПД такого «гибридного» прибора увеличивается более чем в два раза, до 30%, а максимальный электронный КПД составляет величину порядка 25%.

Рассмотрим подробнее результаты усиления СВЧ-сигналов с различной полосой частот с помощью ЛБВ-усилителя с нормальной и аномальной дисперсией.

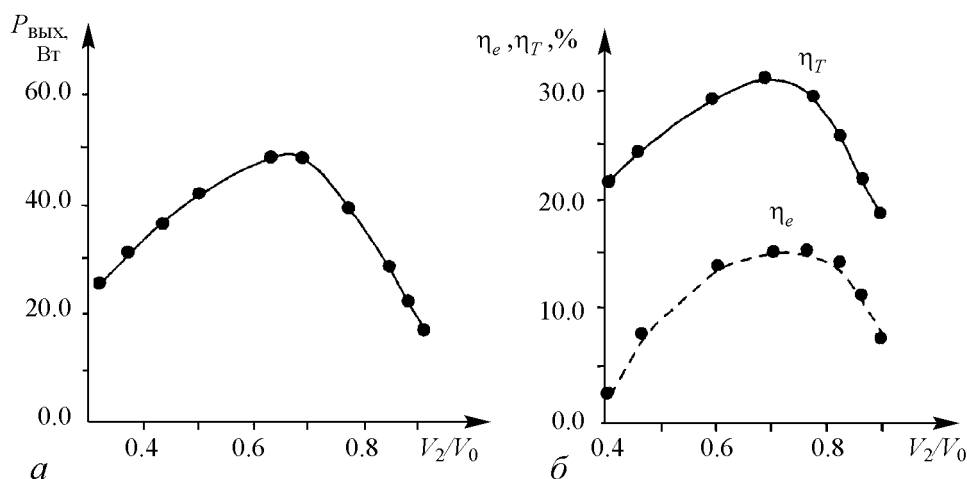


Рис. 4. Зависимости интегральной выходной мощности усиливаемого сигнала  $P_{\text{вых}}$  (а), электронного  $\eta_e$  и технического  $\eta_T$  КПД (б) гибридного прибора от потенциала  $V_2/V_0$  второй секции коллектора-генератора

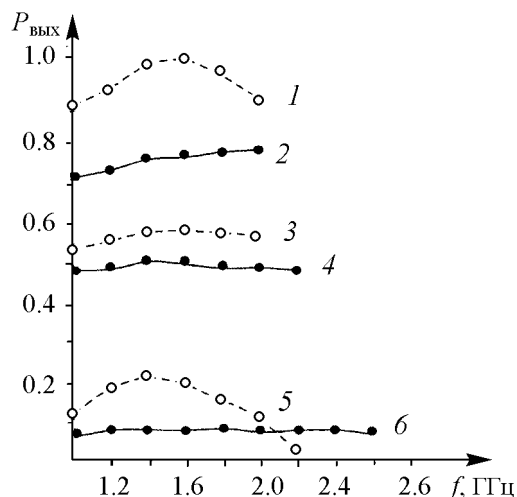


Рис. 5. Зависимости выходной мощности (в относительных единицах) от частоты на выходе ЛБВ для следующих видов входного сигнала: 1, 2 – одночастотный усиливаемый входной сигнал; 3, 4 – широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот входного сигнала  $\Delta f/f = 0.5$ ); 5, 6 – широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот  $\Delta f/f = 1.5$ ). Кривые 1, 3, 5 соответствуют ЛБВ с нормальной (+6%) дисперсией спиральной замедляющей системы; 2, 4, 6 – с аномальной (–4%) дисперсией

На рис. 5 показаны зависимости выходной мощности для различных усиливаемых СВЧ-сигналов – одночастотных и широкополосных хаотических (с шириной полосы  $\Delta f/f$  от 0.5 до 1.5), генерируемых в области коллектора-генератора при различных потенциалах на секциях коллектора. Из рисунка видно, что с ростом ширины полосы усиливаемого сигнала выходная мощность быстро падает как для ЛБВ с нормальной, так и с аномальной дисперсией. При усилении узкополосных сигналов  $\Delta f/f < 1.0$  с точки зрения максимальной интегральной мощности предпочтительнее использовать ЛБВ с нормальной дисперсией (кривые 1, 3, 5 на рис. 5), которая характеризуется большей выходной мощностью на всех частотах в рабочей полосе ЛБВ. Однако при усилении широкополосных хаотических сигналов  $\Delta f/f > 1.0$  использование спиральной замедляющей системы с аномальной дисперсией позволяет

получить более широкую полосу усиливаемых частот выходного сигнала: ср. кривые 5 и 6, построенные при ширине полосы  $\Delta f/f = 1.5$  входного (генерируемого в коллекторе-генераторе) сигнала. В заключение заметим, что вопрос усиления широкополосных хаотических сигналов со сплошным спектром в усилителе бегущей волны (ЛБВ) представляет важный самостоятельный интерес и требует дальнейшего теоретического и экспериментального анализа, поэтому здесь ограничимся только приведением предварительных экспериментальных данных по этому вопросу.

## Выводы

Предложен и экспериментально исследован новый «гибридный» многофункциональный электронно-волновой прибор СВЧ-диапазона на основе лампы бегущей волны с коллектором-генератором. Данный прибор предназначен для получения широкополосных хаотических СВЧ-сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн среднего и большого уровня мощности. Для генерации широкополосных хаотических колебаний в приборе используется принцип низковольтного виркатора [6, 7], то есть генерация маломощных колебаний в пучке с нестационарным виртуальным катодом, формируемым в статическом тормозящем поле. Нестационарный виртуальный катод в новом гибридном приборе формируется в коллекторе-рекуператоре ЛБВ. Сигнал, генерируемый ВК, снимается с помощью широкополосного элемента связи и подается на вход ЛБВ, где и усиливается до среднего уровня мощности. К преимуществам нового прибора можно отнести следующее.

- Предложенный гибридный прибор сочетает достоинства низковольтного виркатора в плане получения сверхширокополосных хаотических сигналов в

СВЧ-диапазоне и большую выходную мощность, характеризующую лампу бегущей волны. При этом принципиально широкая рабочая полоса усиливаемых частот в ЛБВ позволяет эффективно усиливать широкополосный хаотический СВЧ-сигнал, генерируемый с помощью колебаний виртуального катода в коллекторе. Одновременно в предлагаемой схеме нет необходимости формировать отдельный электронный пучок для создания нестационарного ВК в низковольтном виркаторе, который формируется в отработанном в ЛБВ электронном потоке, поступающем в коллектор-генератор. Последнее позволяет создать компактную многофункциональную систему с одним электронным пучком. КПД всей системы определяется, в первую очередь, КПД ЛБВ и может достигать 30–50%.

- Характеристики хаотической генерации в предложенной схеме в плане расширения полосы частот и уменьшения изрезанности спектра улучшаются по сравнению с ранее предложенным низковольтным виркатором, так как в динамическом режиме работы ЛБВ разброс скоростей электронов на входе в коллектор-генератор может быть весьма значителен. Как показано в работе [7], это позволяет значительно улучшить спектральные характеристики широкополосной хаотической генерации в системе с ВК.

- Ширина и изрезанность (неравномерность) спектра генерации предложенной системы на основе ЛБВ с коллектором-генератором в отличие от ЛБВ-генератора с обратной связью (шумотрона) ограничены только шириной полосы генерируемых частот в пучке с ВК (который достигает при оптимальных условиях двух октав) и шириной полосы усиления ЛБВ и никак не определяются фазовыми и амплитудными условиями в цепи обратной связи, благодаря ее отсутствию. Элемент связи между коллектором-генератором и входом ЛБВ фактически не является элементом обратной связи, обеспечивая только подачу маломощного хаотического сигнала, генерируемого ВК, на вход усилителя.

В заключение отметим, что существует возможность значительно увеличить выходную мощность широкополосного хаотического сигнала в такой схеме путем использования более мощных ЛБВ-усилителей. В частности, представляется весьма перспективным рассмотрение подобных гибридных генераторов широкополосных хаотических СВЧ-сигналов на основе плазменнозаполненных ЛБВ [18] или пасотрона – мощного пучково-плазменного усилителя, который имеет возможность работы без фокусирующих магнитных полей [19]. В последнем случае существует возможность создания широкополосного мощного компактного генератора хаотических сигналов дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн без использования фокусирующих электронный пучок магнитных систем.

Автор выражает благодарность профессору Ю.А. Калинину и профессору А.Е. Храмову за полезные обсуждения данной работы.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты №№ 05-02-16286-а, 06-02-81013-Бел-а), а также Президентской программой поддержки Ведущих научных школ РФ (проект НШ-4167.2006.2).*

## **Библиографический список**

1. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 3. С. 385.
2. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.



3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003, 2004.
4. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35, № 2. С. 462.
5. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Вакуумные генераторы широкополосных хаотических колебаний на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом // Изв. РАН. Сер. физическая. 2005. Т. 69, № 12. С. 1724.
6. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1009.
7. Калинин Ю.А., Храмов А.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скорости на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 5. С. 25.
8. Филатов Р.А., Калинин Ю.А., Храмов А.Е. Исследование влияния положительных ионов на СВЧ-генерацию в низковольтном виркаторе // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 11. С. 61.
9. Патент РФ на полезную модель № 59323. СВЧ генератор хаотического широкополосного сигнала на виртуальных катодах / Филатов Р.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 10.12.2006.
10. Патент на изобретение № 2288519. Генератор шумоподобного широкополосного СВЧ-сигнала на виртуальном катоде / Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 27.11.2006. Бюллетень № 33.
11. Патент на изобретение № 2288518. Электровакуумный прибор СВЧ-диапазона / Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Короновский А.А., Егоров Е.Н. // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 27.11.2006. Бюллетень № 33.
12. Патент РФ на полезную модель № 46884. СВЧ-генератор на виртуальном катоде / Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Трубецков Д.И., Егоров Е.Н. // Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 2005. № 21.
13. Патент РФ на полезную модель № 48672. СВЧ-генератор широкополосных шумоподобных колебаний на виртуальном катоде / Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Короновский А.А., Егоров Е.Н. // Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 2005. № 30.
14. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Левин Ю.И., Храмов А.Е. Исследование образования структур и хаотической динамики в нерелятивистском

- электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем электронном поле // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52, № 1. С. 51.
15. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* Исследование мощности СВЧ-генерации в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 9. С. 71.
  16. *Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Е.Н.* Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 6. С. 1118.
  17. *Кузнецов С.П.* Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью // Известия вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 12. С. 1410.
  18. *Переводчиков В.И., Боровиков П.В., Гусев С.И., Завьялов М.А., Конкин В.А., Кузнецов Ю.А., Мартынов В.Ф., Тюрюканов П.М., Шапиро А.Л.* Мощные широкополосные пучково-плазменные усилители СВЧ-колебаний // Прикладная физика. 2001. Т. 5. С. 57.
  19. *Трубевцов Д.И., Храмов А.Е.* Линейная теория взаимодействия электронного пучка с электромагнитными волнами при ионной фокусировке в пазотроне // Физика плазмы. 2004. Т. 30, № 1. С. 80.

*Саратовский государственный  
университет*

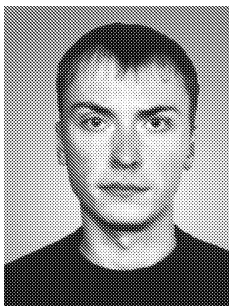
*Поступила в редакцию 25.05.2007  
После доработки 3.09.2007*

**GENERATION AND AMPLIFICATION OF MICROWAVE  
CHAOTIC OSCILLATIONS IN THE HYBRID SYSTEM  
«TRAVELING WAVE TUBE WITH COLLECTOR-GENERATOR»**

*A.V. Mushtakov*

In the paper, the novel hybrid microwave electronic device based on a traveling wave tube and multisectional collector with virtual cathode is suggested and experimentally investigated. The virtual cathode is formed in the electron beam by applying a braking electric field in the collector, i.e. in the part of the device following to the interaction space of traveling wave tube.

It is shown, that microwave broad band chaotic signals are generated and amplified in the device. The corresponding curve has the negligible cutting. Spectral and powers characteristics of the signals for various regimes of the device operation have been found.



*Муштаков Александр Владимирович* – родился в Саратове (1982). Окончил Саратовский государственный университет по специальности радиофизика и электроника (2004). Аспирант кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов: явления в системах с виртуальным катодом.