

09;12

## Исследование широкополосных хаотических СВЧ-колебаний в гибридной системе „лампа бегущей волны с коллектором-генератором“

© Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: noios@sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2007 г.)

Предложен и экспериментально исследован новый гибридный электровакуумный прибор диапазона сверхвысоких частот на основе широкополосного СВЧ-усилителя — лампы бегущей волны (ЛБВ), 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, определены характеристики генерируемых хаотических сигналов (спектральный состав и интегральная мощность) в различных режимах работы гибридного прибора. Кратко рассмотрен вопрос об усилении генерируемого с помощью виртуального катода широкополосного хаотического сигнала в ЛБВ-усилителе.

PACS: 41.75.Fr, 84.40.Fe, 05.45.-a

### 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].

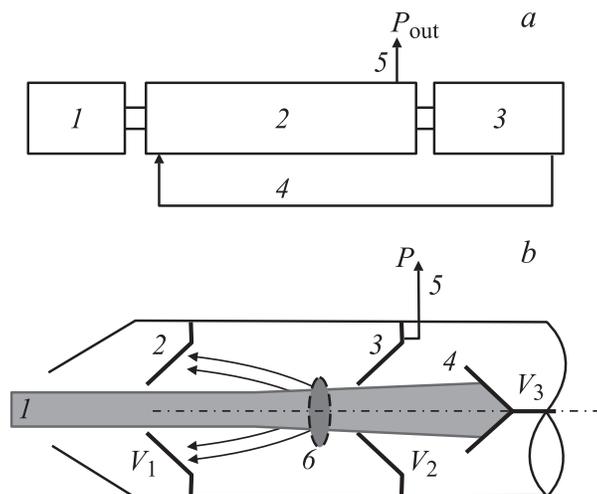
В работах [5–8] предложен и детально исследован генератор широкополосного шумоподобного сигнала на основе электронного пучка с виртуальным катодом, формирующимся в тормозящем статическом поле, так называемый низковольтный виркатор. Принцип функционирования генератора заключается в том, что нерелятивистский интенсивный электронный пучок инжектируется в пространство взаимодействия с тормозящим потенциалом. В результате этого в электронном пучке возникает ВК, 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 2 октав [6,7]. Однако уровень выходной СВЧ-мощности такого генератора достаточно низок [9]. В экспериментальном макете низковольтного виркатора при токе пучка  $J_0 = 100–300$  мА и ускоряющем напряжении  $V_0 = 1–3$  кВ были обнаружены СВЧ-колебания в диапазоне 1–5 GHz с мощностью порядка 0.2–1.0 Вт при электронном КПД, не превышающем нескольких процентов.

В настоящей 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 по формированию различных режимов колебаний, включая режимы широкополосной хаотической генерации со слабой изрезанностью спектра мощности в диапазоне частот более октавы.

### Схема прибора

На рис. 1,а представлены конструктивные элементы предложенного многофункционального СВЧ-прибора на основе широкополосного электронного усилителя с коллектором-генератором. Прибор состоит из нескольких основных функциональных модулей — источника электронов (электронной пушки) 1, мощного широкополосного усилителя СВЧ-сигнала 2, коллектора-генератора 3 и элемента связи 4. Усилительный модуль прибора (лампа бегущей волны) содержит источник электронов 1, формирующий электронный пучок с током  $J_0$ , 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,



**Рис. 1.** Блок-схема гибридного многофункционального генератора-усилителя.

совмещающего функции генератора СВЧ-сигналов на основе ВК (низковольтного виркатора). СВЧ-сигнал, снимаемый в коллекторе-генераторе с помощью широкополосного элемента связи (отрезок спирали или диафрагма, нагруженные на коаксиальную линию), по цепи связи 4 (волновод или коаксиальная линия) попадает на вход усилительного модуля (ЛБВ), далее, усиливаясь в ЛБВ до мощности  $P_{out}$  выводится через элемент вывода энергии 5 в нагрузку.

Таким образом, получаем комбинированный многофункциональный вакуумный СВЧ-прибор, в котором с помощью одного электронного пучка осуществляются 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, достигающей 1–2 октавы. Малая изрезанность спектра и широкая полоса генерируемых частот связаны 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 превращается в добротный резонатор [10–12]. 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. 1, *b* представлена схема используемого в нашем эксперименте коллектора-генератора ЛБВ, на кото-

рой показаны: 1 — отработанный в пространстве взаимодействия ЛБВ электронный пучок, попадающий из него в область коллектора, 2 — первая секция коллектора-рекуператора, на которую подается потенциал  $V_1 < V_0$  ( $V_0$  — ускоряющий потенциал электронов пучка), 3 — вторая секция коллектора-рекуператора с потенциалом  $V_2 < V_1$ , 4 — третья секция коллектора-рекуператора с потенциалом  $V_3 < V_2$ , 5 — широкополосный вывод энергии СВЧ-колебаний из коллектора-рекуператора (в рассматриваемой в статье конструкции коллектора-генератора в качестве вывода мощности используется коаксиальная линия, подключенная к диафрагме второй секции 3-секционного коллектора), 6 — схематическое изображение образующегося в коллекторе-генераторе виртуального катода (в зависимости от соотношения потенциалов секций коллектора ВК может возникнуть как во второй, так и в третьей секциях коллектора-генератора).

Рассмотрим кратко принцип действия многофункционального прибора „электронный усилитель (ЛБВ) с коллектором-генератором“. Отработанный в ЛБВ электронный пучок с большим разбросом по скоростям (см., например, [13]) 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 обсуждаются 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 [13], позволяет значительно улучшить характеристики СВЧ-сигнала в режиме хаотической генерации, т. е. ширина полосы частот генерируемых колебаний расширяется, а также уменьшается изрезанность спектра мощности хаотического сигнала.

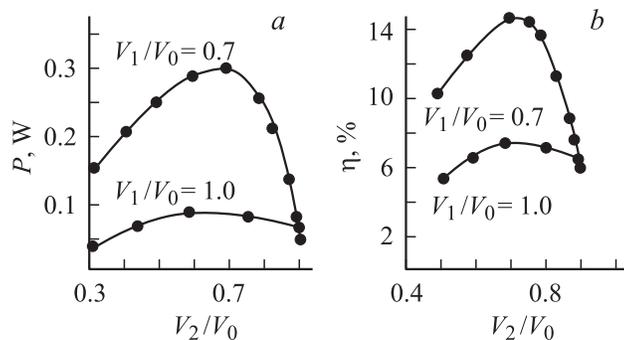
СВЧ-сигнал колебаний ВК, снимаемый из коллектора-генератора, через элемент вывода энергии по цепи связи поступает на вход усилителя (лампы бегущей волны), где происходит усиление сигнала генерируемого коллектором-генератором. Далее полученный усиленный хаотический широкополосный сигнал выводится из комбинированного 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 [5,6,9].

## Результаты исследований генерации и усиления хаотических сигналов в комбинированной системе „ЛБВ с коллектором-генератором“

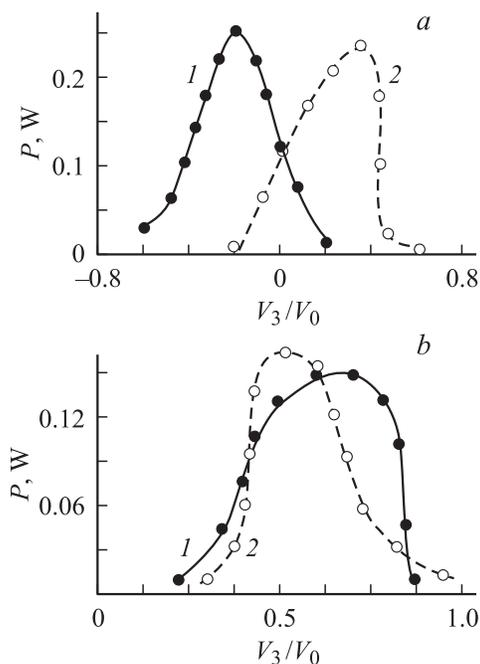
Рассмотрим результаты экспериментального исследования генерации и усиления широкополосного хаотического сигнала в электронно-волновой системе „ЛБВ-усилитель с коллектором-генератором“. В качестве исследуемой ЛБВ использовались пакетированные спиральные ЛБВ сантиметрового диапазона длин волн (рабочая полоса частот 1–2 GHz) с трехступенчатым электростатическим коллектором. Основные характеристики ЛБВ следующие: ускоряющее напряжение  $V_0 = 2–2.5$  kV, ток пучка  $J_0 = 100–150$  mA. Коэффициент усиления в одночастотном режиме составляет  $K_y = 40–45$  dB, выходная мощность  $P_{out} = 40–55$  W, электронный КПД  $\eta_e = 22–24\%$ , технический КПД  $\eta_1 = 35–42\%$ . Рассматривались ЛБВ с нормальной  $+6\%$ -ной дисперсией замедляющей системы и ЛБВ с аномальной  $-4\%$ -ной дисперсией.

Для анализа широкополосных хаотических сигналов, генерируемых в системе, использовался высокочастотный анализатор спектра Agilent ESA E4402B (диапазон частот от 10 kHz до 3 GHz) и ваттметр поглощаемой мощности M3-51. Для анализа также использовались высокочастотные (полоса частот 2–4 MHz) 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.

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости КПД  $\eta$  генерации и мощности  $P$  сигнала, регистрируемого с выхода коллектора-генератора при изменении потенциала  $V_2$  второй секции коллектора при потенциале на третьей секции  $V_3 = 0$  и двух различных потенциалах  $V_1$  первой секции (отмечены на рисунках). Отметим, что



**Рис. 2.** Зависимость КПД  $\eta$  (a) и мощности  $P$  (b) СВЧ-колебаний в коллекторе-рекуператоре в зависимости от потенциала второй секции коллектора при двух значениях потенциала первой секции.



**Рис. 3.** Зависимость мощности  $P$  СВЧ-колебаний при изменении потенциала  $V_3$  третьей секции коллектора-генератора при фиксировании различных тормозящих потенциалов на первой и второй секциях коллектора: 1 —  $V_1/V_0 = V_2/V_0 = 1$ ; 2 —  $V_1/V_0 = 0.7$ ;  $V_2/V_0 = 0.5$ ; a — для статического режима ЛБВ (без входного сигнала), b — для динамического режима, когда на вход ЛБВ подается СВЧ-сигнал, генерируемый коллектором-генератором.

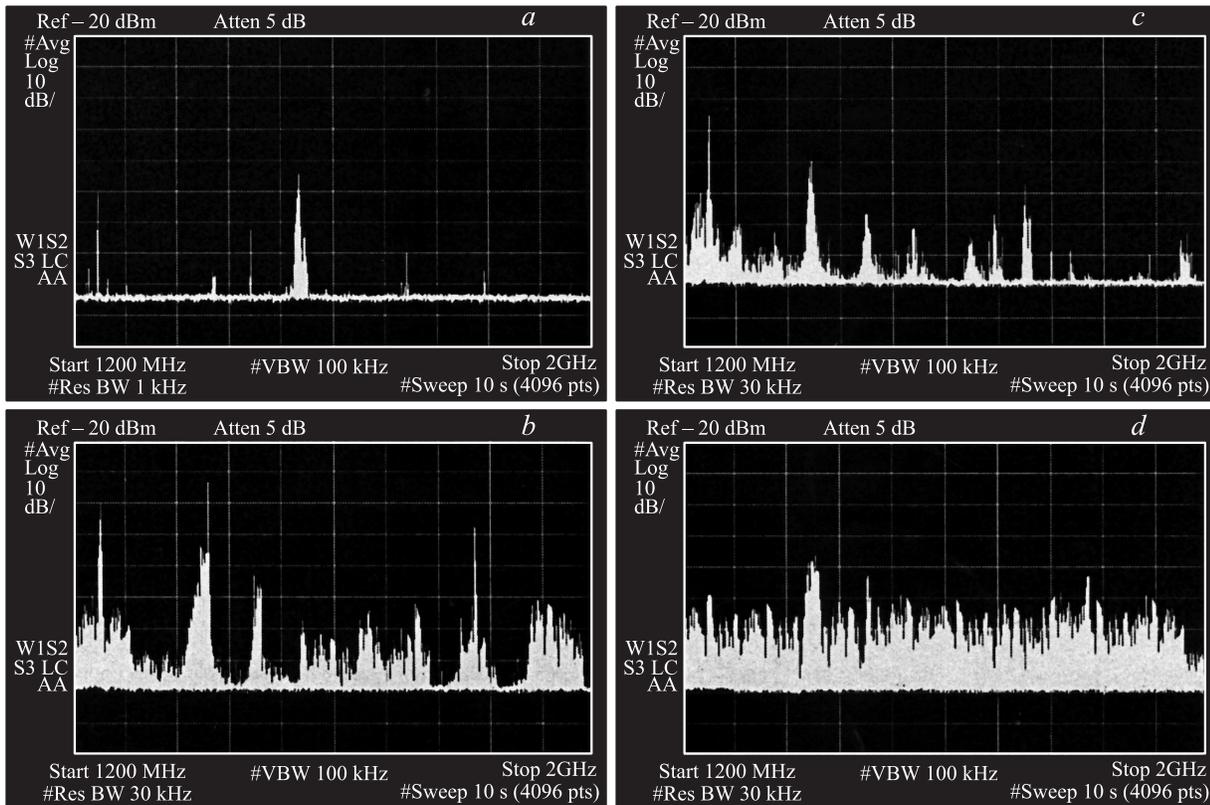
КПД колебаний в коллекторе-рекуператоре определялся как [14]

$$\eta = \frac{P}{\sum_i I_i V_i}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $I_i$  и  $V_i$  — ток и потенциал  $i$ -й ступени коллектора-рекуператора,  $P$  — мощность колебаний, регистрируемых на выходе коллектора.

Как видно из рис. 2, a, мощность генерации при этом достигает значения порядка 300 mW в наиболее благоприятном режиме работы. При этом КПД (см. рис. 2, b) подобного коллектора-генератора достигает от 4 до 14% в зависимости от тормозящего потенциала  $V_2$  и различного соотношения потенциалов электродов внутри коллектора-генератора.

Аналогичные зависимости наблюдаются при изменении потенциала  $V_3$  третьей секции коллектора-генератора при фиксировании различных тормозящих потенциалов на первой и второй секциях коллектора. Соответствующие зависимости построены для статического (рис. 3, a; случай, когда на вход ЛБВ не подается входной сигнал для усиления — статический режим ЛБВ, который характеризуется отсутствием разброса электронов по скоростям на выходе из замедляющей системы — на входе коллектора-генератора) и динамического режимов (рис. 3, b; на вход ЛБВ-усилителя подается для усиления СВЧ-сигнал, генериру-



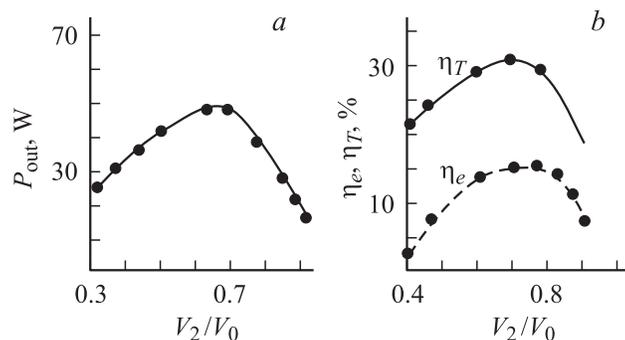
**Рис. 4.** Спектры регистрируемых колебаний в коллекторе-генераторе; *a, b* — для статического режима работы ЛБВ при потенциалах коллектора  $V_1/V_0 = 0.7$ ,  $V_2/V_0 = 0.5$ ,  $V_3/V_0 = 0.45$  и  $0.25$  соответственно; *c, d* — для динамического режима работы при  $V_1/V_0 = 0.7$ ,  $V_2/V_0 = 0.5$ ,  $V_3/V_0 = 0.7$  и  $0.6$  соответственно.

емый коллектором-генератором, разброс по скоростям электронов достаточно велик). Видно, что с увеличением торможения мощность генерации достигает своего максимума и затем снова уменьшается. Последнее хорошо согласуется с результатами экспериментальных и теоретических исследований низковольтного виркатора [6,7,9].

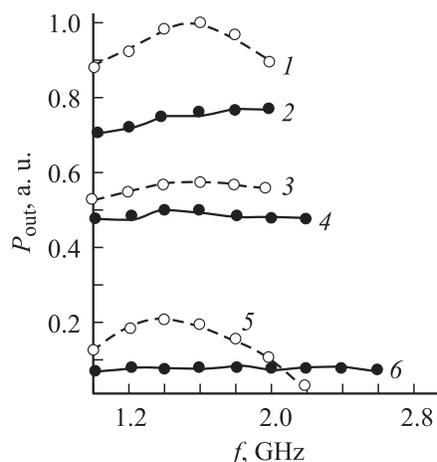
Соответствующие спектры колебаний в пучке с виртуальным катодом, регистрируемые на выходе коллектора-генератора, в статическом и динамическом режимах работы ЛБВ показаны на рис. 4. Спектры на рис. 4, *a, b* получены по сигналу, снятому с выхода коллектора-генератора в статическом режиме, на рис. 4, *c, d* — в динамическом режиме работы ЛБВ. Рис. 4, *a* и *c* построены при малых тормозящих потенциалах на ступенях коллектора, рис. 4, *b* и *d* — при большом торможении пучка в коллекторе. Видно, что при малом торможении в статическом режиме работы ЛБВ наблюдается генерация близкого к одночастотному сигнала (рис. 4, *a*). 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 (рис. 4, *b-d*). Однако в динамическом режиме работы ЛБВ, который характеризуется значи-

тельным разбросом электронов по скоростям на входе в коллектор-генератор, спектр генерируемого сигнала демонстрирует сплошной спектр генерации в полосе частот  $\Delta f > 1$  GHz и существенно меньшую изрезанность  $N$  в рабочей полосе частот ( $N = P_{\max}/P_{\min}$ , где  $P_{\max}$  и  $P_{\min}$  — максимальная и минимальные 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.

Зависимости, представленные на рис. 5, позволяют продемонстрировать преимущества конструкции предложенного многофункционального прибора. На рис. 5 показаны зависимости 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. Таким образом, на рис. 5 показаны характеристики всего прибора в целом, а не только коллектора-генератора, как на предыдущих рисунках. Видно, что интегральная мощность  $P_{\text{out}}$  широкополосных хаотических колебаний, регистрируемых в коллекторе-генераторе, усиливается более чем в сто раз, достигая 50 W, что составляет усиление по мощности около 30 dB. При этом технический КПД такого „гибрид-



**Рис. 5.** Зависимости интегральной выходной мощности усиленного сигнала  $P_{out}$  (а), электронного  $\eta_e$  и технического  $\eta_T$  КПД (б) гибридного прибора в зависимости от потенциала  $V_2/V_0$  второй секции коллектора-генератора.



**Рис. 6.** Зависимости выходной мощности (в относительных единицах) от частоты на выходе ЛБВ для случаев: 1 — одночастотный усиливается входной сигнал  $\Delta f/f = 0$ , ЛБВ с нормальной +6%-ной дисперсией спиральной замедляющей системы; 2 — одночастотный входной сигнал  $\Delta f/f = 0$ , ЛБВ с аномальной -4%-ной дисперсией; 3 — широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот входного сигнала  $\Delta f/f = 0.5$ ), ЛБВ с нормальной +6%-ной дисперсией; 4 — широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот  $\Delta f/f = 0.5$ ), ЛБВ с аномальной -4%-ной дисперсией; 5 — широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот  $\Delta f/f = 1.5$ ), ЛБВ с нормальной +6%-ной дисперсией; 6 — широкополосный хаотический входной сигнал (полоса частот  $\Delta f/f = 1.5$ ), ЛБВ с аномальной -4%-ной дисперсией.

ного“ прибора увеличивается более чем в два раза — до 30%, а максимальный электронный КПД составляет порядка 25%.

Рассмотрим подробней результаты усиления СВЧ-сигналов с различной полосой частот с помощью ЛБВ-усилителя с нормальной и аномальной дисперсией. Зависимости выходной мощности ЛБВ от частоты сигнала приведены на рис. 6. На рисунке показаны зависимости выходной мощности для различных усиливается СВЧ-сигналов — одночастотных и широкополосных хаотиче-

ских (с шириной полосы  $\Delta f/f < 0.5-1.5$ ), генерируемых в области коллектора-генератора при различных потенциалах на секциях коллектора. Из рис. 6 видно, что с ростом ширины полосы усиливается сигнала выходная мощность быстро падает для ЛБВ как с нормальной, так и аномальной дисперсией. При усилении узкополосных сигналов  $\Delta f/f \leq 1.0$  с точки зрения максимальной интегральной мощности более предпочтительно использовать ЛБВ с нормальной дисперсией (кривые 1, 3, 5 на рис. 6), 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 усиливается 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

В работе 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], т.е. 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.

1. 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 усиливается 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 отработавшем 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%.

2. Характеристики хаотической генерации в предложенной схеме в плане увеличения ширины полосы частот и уменьшения изрезанности спектра могут быть более оптимальными 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.

3. 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 ЛБВ с электродинамическими системами типа цепочек связанных резонаторов [3].

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, проф. Д.И. Трубецкову за полезные обсуждения данной работы.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 07-02-12071 и 06-02-72007), а также Президентской программой поддержки Ведущих научных школ РФ (проект НШ-355.2008.2). А.Е. Храмов благодарит за поддержку Президентскую программу поддержки молодых докторов наук (проект МД-1884.2007.2) и фонд некоммерческих программ „Династия“.

## Список литературы

- [1] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РЭ. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
- [2] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х т. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [4] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
- [5] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [6] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [7] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 25–34.
- [8] Филатов Р.А., Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 11. С. 61–67.
- [9] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 9. С. 71–78.
- [10] Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Е.Н. // РЭ. 1979. Т. 24. № 6. С. 1118.
- [11] Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н. // РЭ. 1980. Т. 25. № 10. С. 2160.
- [12] Кузнецов С.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. С. 1410.
- [13] Калинин Ю.А., Панин А.Ф., Украинская Т.Н. // Электронная техника. 1976. Сер. 1 (2). С. 111.
- [14] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Высш. шк. 1972.