

09;12

Малогабаритный сверхнизковольтный генератор широкополосных хаотических колебаний

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Л.Н. Волкова, Ю.И. Левин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: StarodubovAV@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 июня 2010 г.

Рассмотрена конструкция малогабаритного сверхнизковольтного генератора широкополосных хаотических СВЧ-колебаний. Рассмотрены основные выводы по результатам численного моделирования. Приведены результаты детального экспериментального исследования различных режимов работы исследуемого генератора. Перспективность исследованной конструкции сверхнизковольтного генератора обусловлена малыми значениями требуемых ускоряющих напряжений (до 1000 V), относительно большими значениями тока пучка (до 800 mA), КПД устройства (до 5%), а также малыми геометрическими размерами генератора.

В настоящее время неослабевающее внимание исследователей и инженеров к генераторам хаоса, в частности в СВЧ-диапазоне, обусловлено не только решением ряда фундаментальных задач [1], но и множеством прикладных областей применения широкополосных хаотических сигналов в качестве новых носителей информации [2–4] в системах связи, радиолокации, а также при решении задач радиопротиводействия [3]. Целый ряд технологических процессов обрабатывающей промышленности [4] (например, обезвоживание, очистка и повышение качества нефти и нефтепродуктов [5], органический синтез с использованием поглощения СВЧ-энергии и т.п.) также представляется перспективной областью применения подобных сигналов. Для генерации таких сигналов необходимы разработка и создание широкополосных источников хаоса, работающих в диапазоне сверхвысоких частот. Наиболее перспективным представляется использование источников широкополосных и сверхширокополосных хаотических сигналов малого и среднего уровня мощности, основанных на новых способах генерации хаотических сигналов (низковольтные виркаторы): исполь-

зование сильно неламинарных (турбулентных) электронных пучков с наличием значительного количества сгустков пространственного заряда, совершающих пространственно-временные колебания, которые являются источниками широкополосного микроволнового излучения (до двух октав) со слабой изрезанностью спектра мощности [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования малогабаритного сверхнизковольтного генератора хаотических СВЧ-колебаний. Назовем конструкцию предлагаемого генератора „сверхнизковольтным виркатором“.

Известны конструкции низковольтных виркаторов, работающих при относительно больших ускоряющих напряжениях (1000–3000 V), малых токах пучка (100–150 mA) и имеющих значительные габаритные размеры [7,8]. При этом КПД таких устройств составляет 1–2%. Представляет интерес рассмотрение схем с уменьшенными значениями ускоряющего напряжения и уменьшенными габаритами при повышенном значении КПД. В этой связи предлагается формирование турбулентного пучка непосредственно в области электронной пушки (рис. 1). В пушке отсутствует анод, а ускоряющее напряжение подается на модулирующую сетку, расположенную вблизи катода. В этом случае возрастает величина тока пучка при относительно малых напряжениях на модулирующей сетке. С целью защиты модулирующей сетки от перегрева перед ней располагается экранирующая сетка, находящаяся под потенциалом катода.

Турбулентный электронный поток с большим разбросом электронов по скоростям, формируемый в области электронной пушки (обозначена цифрой 1 на рис. 1), попадает в тормозящее электрическое поле в области „сетки–коллектор“ (область 2 на рис. 1), способствующее формированию сгустков пространственного заряда, интенсивные пространственно-временные колебания которых регистрируются отрезком электродинамической системы. С целью увеличения количества создаваемых сгустков пространственного заряда система помещается в неоднородное магнитное поле, которое способствует увеличению степени турбулентности электронного потока. По методике, детально описанной в работе [6,9], был проведен расчет электронных траекторий в системе сверхнизковольтного генератора хаотических колебаний в широком диапазоне изменения напряжения на управляющей сетке и коллектора, а также величины распределения амплитуды магнитного поля.

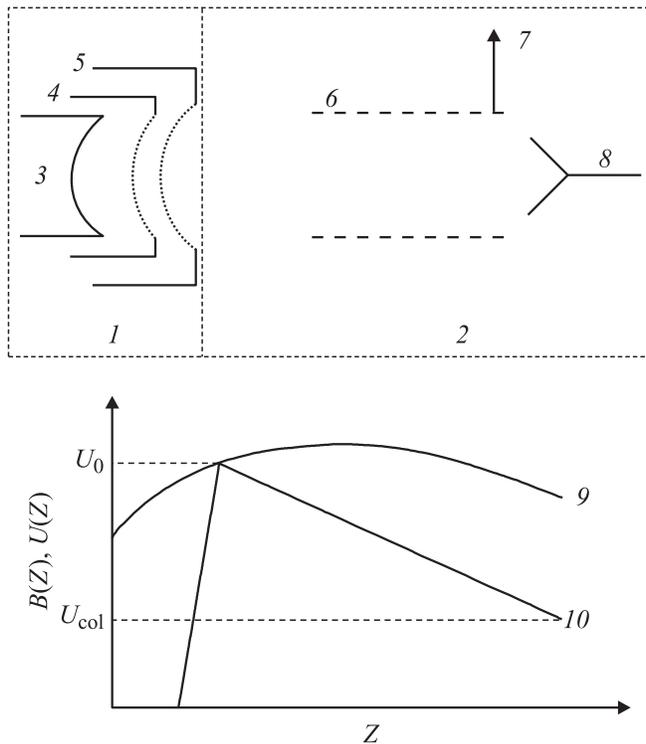


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции сверхнизковольтного малогабаритного генератора хаоса: 1 — секция электронной пушки; 2 — секция с тормозящим электрическим полем; 3 — катод; 4 — экранирующая сетка; 5 — модулирующая сетка; 6 — съемник энергии; 7 — вывод энергии; 8 — коллектор; 9, 10 — схематичное изображение распределения внешнего неоднородного магнитного поля и электрического поля соответственно.

Основное внимание при проведении численного моделирования было уделено образованию областей пространства, в которых локализуется большой пространственный заряд (сгустки пространственного заряда). Интенсивные пространственно-временные колебания таких сгустков являются источниками широкополосных микроволновых сигналов [6,9–12].

Анализ результатов численного расчета позволил установить следующее. Во-первых, наблюдается турбулизация электронного пучка в области между управляющей сеткой и коллектором. Во-вторых, количество сгустков пространственного заряда и интенсивность их пространственно-временных колебаний увеличиваются путем подбора таких управляющих параметров, как ток электронного пучка I_0 , потенциал управляющей сетки (ускоряющее напряжение U_0), коэффициент торможения электронного пучка $K = 1 - U_0/U_{col}$, где U_{col} — напряжение на коллекторе. В-третьих, при определенных соотношениях между управляющими параметрами отношение плотности пространственного заряда ρ/ρ_0 (где ρ_0 — начальная плотность пространственного заряда) в электронных сгустках может достигать 200 и более единиц, а количество сгустков достигает 10–12.

Экспериментальные исследования были проведены при ускоряющих напряжениях $U_0 = 100\text{--}1000\text{ V}$, значениях коэффициента торможения электронного пучка $K = 0\text{--}1$ и значениях амплитуды магнитного поля B до 0.1 Т. Питание лабораторного образца генератора осуществлялось в импульсном режиме. Длительность импульса ускоряющего напряжения составляла от 5 до 50 μs , значение величины скважности составило 1000 единиц.

Результаты экспериментального исследования тока пучка от величины ускоряющего напряжения приведены на рис. 2, *a*. На рис. 2, *b* приведены результаты экспериментальной зависимости выходной мощности P при различных значениях ускоряющего напряжения U_0 от величины коэффициента торможения электронного пучка K . Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что чем больше величина ускоряющего напряжения, тем меньшие значения коэффициента торможения электронного пучка требуются для достижения режима генерации хаотических СВЧ-колебаний. Максимальные значения интегральной выходной мощности составляют: для $U_{col} = 1000\text{ V}$ $P_{max} = 300\text{ W}$, $U_{col} = 700\text{ V}$ $P_{max} = 43\text{ W}$, $U_{col} = 200\text{ V}$ $P_{max} = 1\text{ W}$. Кроме того, проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что с увеличением коэффициента торможения электронного пучка наблюдается рост ширины спектра генерируемых хаотических СВЧ-колебаний. На рис. 3, *a* приведена зависимость ширины спектра генерируемых колебаний $\Delta f/f$ от величины K . Приведенный результат получен при ускоряющем напряжении $U_0 = 700\text{ V}$ и токе пучка $I_0 = 480\text{ mA}$.

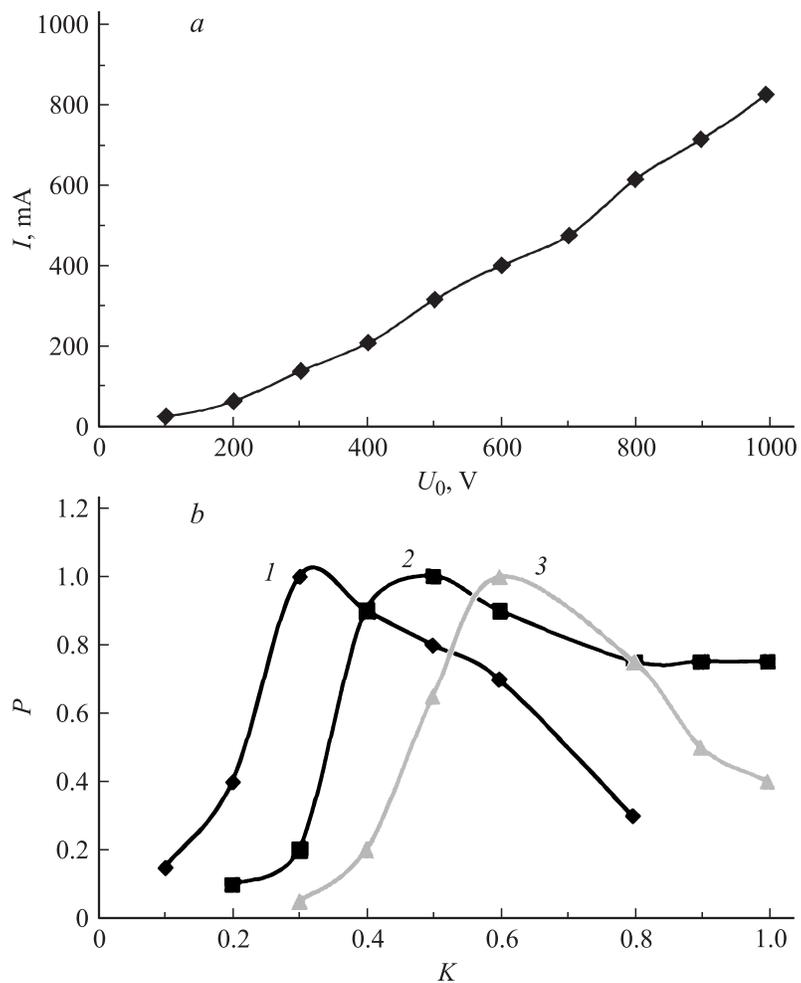


Рис. 2. Результаты экспериментальных исследований: *a* — зависимость тока пучка I_0 от величины ускоряющего напряжения U_0 ; *b* — зависимость нормированной мощности колебаний P от величины коэффициента торможения электронного пучка K при различных ускоряющих напряжениях: 1 — $U_0 = 1000$ V, 2 — $U_0 = 700$ V, 3 — $U_0 = 200$ V.

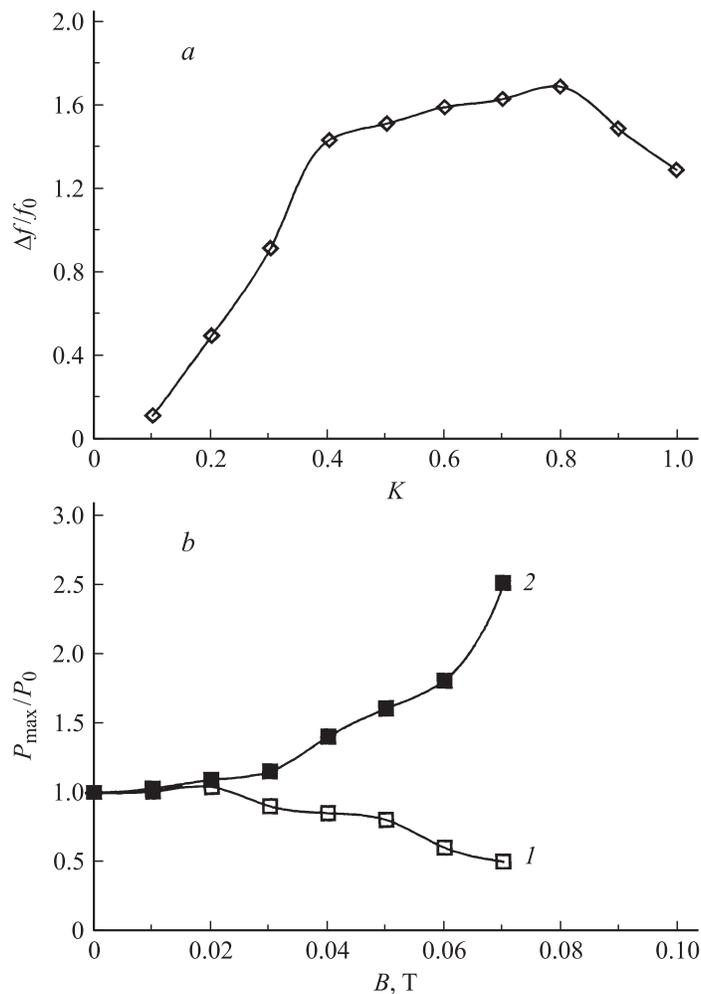


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований: *a* — зависимость ширины полосы генерации $\Delta f/f_0$ от величины коэффициента торможения электронного пучка K ; *b* — зависимость величины максимальной выходной мощности, нормированной на начальное значение P_0 (амплитуда магнитного поля $B = 0$), от амплитуды магнитного поля. 1, 2 — случай однородного и неоднородного магнитного поля соответственно.

На рис. 3, *b* приведена зависимость максимальной выходной мощности генерируемых хаотических колебаний от амплитуды однородного (кривая 1) и неоднородного (кривая 2) магнитного поля. Из рисунка отчетливо видно, что с увеличением амплитуды постоянного однородного магнитного поля наблюдается уменьшение выходной интегральной мощности. Обнаруженный эффект, как показывает численное моделирование, объясняется тем, что уменьшаются количество и плотность ступок пространственного заряда. Неоднородное магнитное поле приводит к обратному эффекту — наблюдается рост как количества ступок пространственного заряда, так и их плотности, что приводит к увеличению выходной интегральной мощности. Максимальная величина КПД исследуемого устройства составляет 3–5%.

Таким образом, в данной работе проведено исследование перспективного сверхнизковольтного малогабаритного генератора широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний. Перспективность исследованной конструкции сверхнизковольтного виркатора обуславливают следующие причины:

- 1) малые значения необходимых для работы ускоряющих напряжений (до 1000 В) и относительно большой ток пучка;
- 2) наличие широкого спектра управляющих параметров: ток пучка I_0 , ускоряющее напряжение U_0 , амплитуда внешнего магнитного поля B ;
- 3) относительно большие значения КПД устройства;
- 4) малые габариты устройства (продольный размер — до 70 мм, поперечный размер — до 50 мм).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-02-00256-а, Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-3407.2010.2) и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (РНП 2.1.1./235).

Список литературы

- [1] *Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот* / Под ред. Д.И. Трубецкова, А.А. Короновского, А.Е. Храмова. М.: Физматлит, 2009. Т. 2. С. 383.
- [2] *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит. 2002.

- [3] *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [4] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит. 2003, 2004.
- [5] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В.* // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 45–48.
- [6] *Калинин Ю.А., Волкова Л.Н.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 65–73.
- [7] *Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 8. С. 53–55.
- [8] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69. В. 13. С. 1724.
- [9] *Алямовский И.В.* // Интенсивные электронные потоки. М., 1991.
- [10] *Афанасьев В.И., Лукин К.А., Ракитянский В.А.* Возбуждение хаотических колебаний в ЛОВО неламинарными электронными пучками // Радиофизика и электроника. Национальная академия Украины. 1997. Т. 2. № 1. С. 115–118.
- [11] *Пащенко А.В., Залкинд В.М., Лонин Ю.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 84–89.
- [12] *Калинин Ю.А., Лазерсон А.Г., Чемичев Г.В.* // Изв. вузов. ПНД. 1995. Т. 3. № 4. С. 32–39.