

09;10;12

## Перестраиваемый генератор широкополосных хаотических СВЧ колебаний на турбулентных пучках

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

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

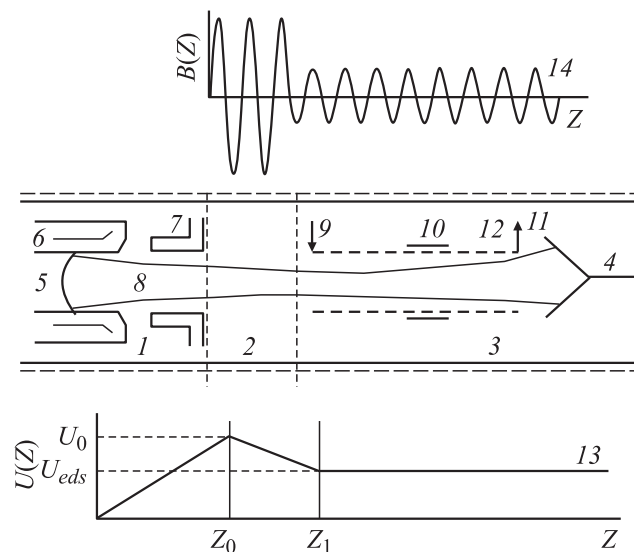
Поступило в Редакцию 5 мая 2010 г.

Предложена новая конструкция генератора хаотических широкополосных СВЧ колебаний среднего уровня мощности на турбулентных пучках с возможностью перестройки режима генерации. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование характеристик турбулентных электронных пучков. Установлено, что торможение электронного пучка приводит к его турбулизации, что ведет к возбуждению хаотических широкополосных СВЧ колебаний.

В настоящее время перспективным направлением в развитии СВЧ электроники является создание источников СВЧ колебаний с малой изрезанностью спектра и широкой полосой генерации (порядка 1–2 октавы). Такие устройства находят применение в связи, радиолокации, измерительной технике. Известен класс генераторов хаотических СВЧ сигналов — низковольтных виркаторов [1–3], способных генерировать сигналы с шириной полосы частот до 2 октав и с перестройкой режимов генерации. Однако подобные устройства имеют ряд недостатков, связанных с низким уровнем выходной мощности (100–200 мВт) и небольшим КПД (1.5–2%), что делает эти приборы малоэффективными.

В данной работе рассмотрен более эффективный перестраиваемый генератор СВЧ колебаний на турбулентных электронных пучках. Схема генератора представлена на рис. 1.

Принцип работы генератора следующий. Электронный пучок формируется электронной пушкой. Он инжектируется в секцию модуляции, где под действием неоднородного магнитного [4–6] и тормозящего электрического поля становится турбулентным, состоящим по длине из отдельных сгустков пространственного заряда. Тормозящее электрическое поле создается путем подачи потенциала  $U_{eds} < U_0$ , где  $U_{eds}$  —



**Рис. 1.** Принципиальная схема исследуемого генератора. Цифрами на рисунке обозначены: 1 — секция электронной пушки, 2 — секция модуляции электронного пучка, 3 — секция усиления, 4 — коллектор, 5 — катод, 6 — система электродов, 7 — анод, 8 — электронный пучок, 9 — ввод энергии; 10 — поглотитель, 11 — вывод энергии (съемник энергии), 12 — электродинамическая система усиления, 13 — вид распределения потенциала  $U(z)$ ; 14 — вид распределения магнитного поля  $B(z)$ .

потенциал на электродинамической системе усилителя (ЭДСУ),  $U_0$  — ускоряющее напряжение на аноде. Промодулированный электронный пучок попадает в область ЭДСУ, где происходит его усиление. Из области ЭДСУ отработанный пучок попадает в коллектор. Выходной сигнал снимается с усилителя через вывод энергии. Режим генерации в устройстве регулируется путем изменения потенциала на ЭДСУ  $U_{eds}$ .

Под действием сильного магнитного поля плотность пространственного заряда в некоторых областях пучка в 50–70 раз превышает начальные значения, что приводит к образованию отдельных сгустков (групп электронов), неустойчивых в пространстве и во времени. Движущийся сгруппированный интенсивный электронный пучок обладает

мощностью, которая может быть превращена в радиоизлучение в процессе его торможения.

Теоретическое исследование заключалось в проведении численного моделирования. Расчет непараксиальных неламинарных траекторий пучка в области модуляции проводился на основе решения уравнений движения по методике работы [7].

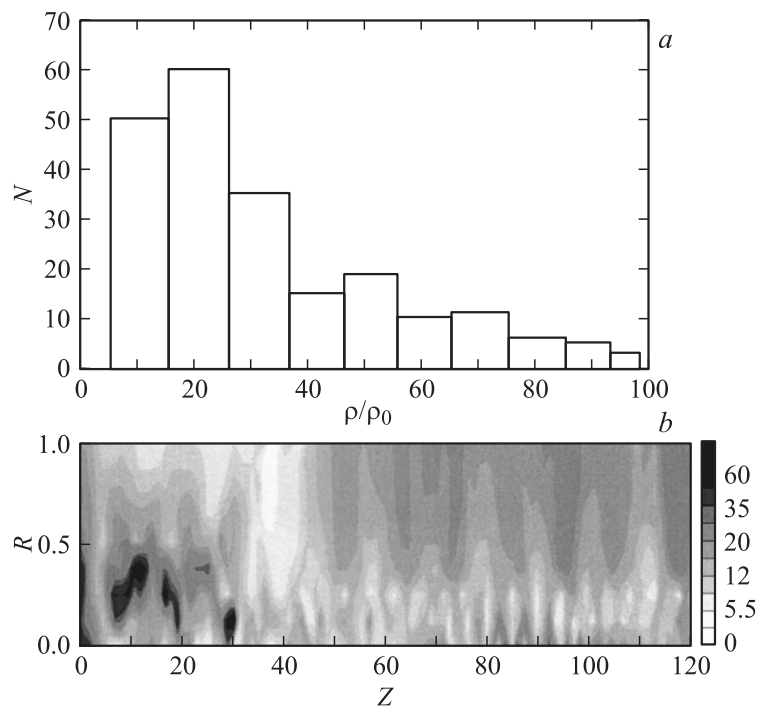
Стационарная двумерная модель электронного потока основана на решении системы уравнений, описывающих траектории электронов, распространяющихся в неоднородном магнитном и тормозящем электрическом поле. Электронный пучок на входе разбивается на  $N$  заряженных цилиндров толщиной  $dr$ . Для каждого цилиндра решались уравнения движения в цилиндрических координатах [7].

Параметры численной схемы были выбраны следующие: начальный радиус электронного пучка  $r_0 = 5$  мм, ускоряющее напряжение  $U_0 = 1500$  В, ток пучка  $I = 100$  мА, количество крупных частиц  $N$  было выбрано равным 20. Амплитуда поля в области возбуждения  $B_0 = 0.07$  Т. Амплитуда магнитного поля в области усиления потока составляла  $B_0 = 0.06$  Т. Радиус трубы в области генерации  $r_m = 10$  мм. В уравнениях использовались безразмерные величины продольной и поперечной координат:  $R = r/r_m$ , где  $r_m$  — радиус трубы дрейфа в секции модуляции пучка,  $Z = 2\pi z/L$ ,  $L$  — период магнитного поля. Система уравнений решалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка с шагом  $h = 0.01$ . Распределение потенциала в области между анодом и ЭДСУ задавалось линейной функцией. Данное приближение является допустимым, поскольку радиус пучка много меньше расстояния между анодом и ЭДСУ.

Проведен расчет количества сгустков пространственного заряда при различных значениях коэффициента торможения электронного пучка  $K$ , который определяется следующим образом:

$$K = 1 - U_{eds}/U_0.$$

Учитывались те сгустки, плотность пространственного заряда которых  $\rho$  больше начальной плотности  $\rho_0$ . В ходе численных экспериментов было установлено, что при малом торможении  $K = 0.4$  (рис. 2, а) в распределении количества сгустков пространственного заряда есть выраженный максимум. При больших значениях коэффициента торможения  $K$  распределение количества сгустков более равномерное, без



**Рис. 2.** Результаты численного моделирования. *a* — вид распределения количества сгустков плотности пространственного заряда при  $K = 0.4$ , *b* — распределение плотности пространственного заряда  $\rho(R, z)$  пучка при  $K = 0.4$ .

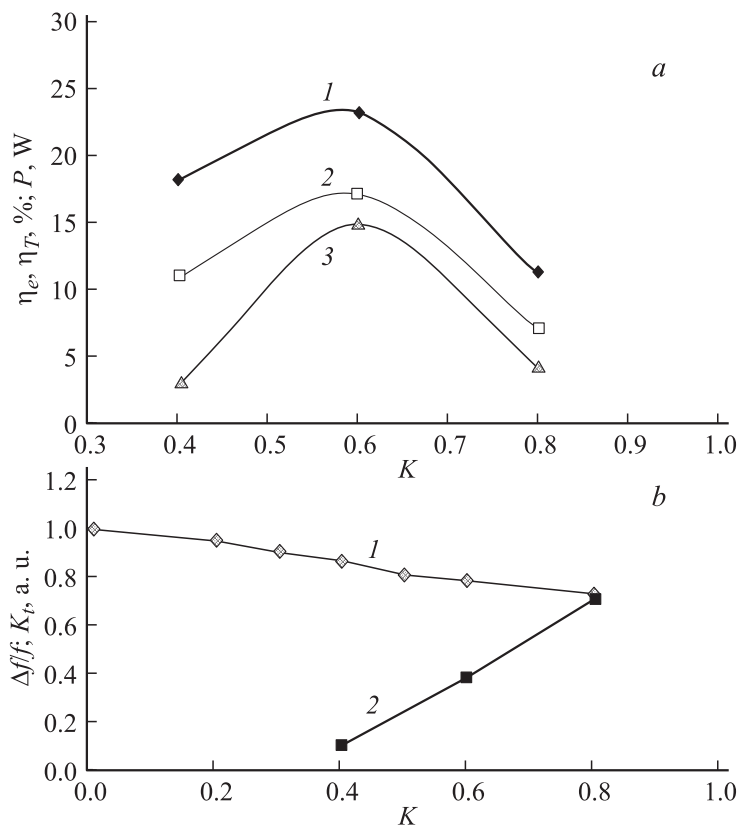
ярко выраженных максимумов. На рис. 2, *b* представлена плотность пространственного заряда в режиме малого торможения  $K = 0.4$ . Нормировка производилась к начальному значению плотности пространственного заряда. Наиболее темные области соответствуют плотности пространственного заряда, в 70 раз превышающей начальное значение. Исследование показало, что формирование турбулентных электронных пучков может быть проведено путем либо значительного увеличения амплитуды магнитного поля, либо за счет применения комбинации небольшого по амплитуде магнитного поля и тормозящего электрического поля. Последний случай является предпочтительным, поскольку

в данном случае, как показало проведенное численное моделирование, токопрохождение в системе выше.

Был исследован также случай, когда есть начальный разброс продольных скоростей. Начальная продольная скорость изменялась по линейному закону так, что на оси пучка ее величина максимальна и равна  $v_0$ , а на границе пучка изменялась от  $0.5v_0$  до  $0.7v_0$ . Получены следующие результаты. При отсутствии торможения и магнитном поле  $0.05\text{ Т}$  в электронном пучке уже имеются сгустки пространственного заряда, плотность которых в несколько раз превышает начальное значение. Установлено, что чем меньше продольная скорость на границе пучка, тем меньшее значение величины тормозящего потенциала необходимо для достижения максимального количества сгустков в пучке и максимального токопрохождения.

Экспериментальные исследования проводились при ускоряющем напряжении  $1500\text{--}2000\text{ В}$ , ток пучка  $100\text{--}150\text{ мА}$ , амплитуда магнитного поля  $0.05\text{--}0.07\text{ Т}$ , период  $40\text{ нс}$ . Режим работы — импульсный: длительность импульса  $\tau = 50\text{ мкс}$ , скважность  $Q = 1000$ . Зависимость выходной мощности  $P$  от величины коэффициента торможения электронного пучка  $K$  приведена на рис. 3, *a*, кривая 2. Из рисунка отчетливо видно, что зависимость  $P(K)$  имеет участки нарастания и спада. Спад выходной мощности связан с тем, что образующиеся сгустки пространственного заряда при больших величинах  $K$  становятся менее плотными, так как увеличивается токооседание на ЭДСУ. Зависимости электронного (кривая 3) и технического КПД (кривая 1) от потенциала ЭДСУ также имеют области нарастания и спада. С ростом тормозящего потенциала полоса генерируемых частот увеличивается (рис. 3, *b*, кривая 2), что связано с образованием большого количества сгустков пространственного заряда. Экспериментально измеренная зависимость токопрохождения от коэффициента торможения электронного пучка  $K$  приведена на рис. 3, *b*, кривая 1. Видно, что с увеличением  $K$  токооседание увеличивается, что приводит к уменьшению генерируемой выходной мощности (см. рис. 3, *a*, кривая 2).

Таким образом, в данной работе представлен перестраиваемый генератор широкополосных хаотических СВЧ колебаний на основе турбулентных электронных пучков, в котором реализована простая и эффективная схема управления режимом генерируемых колебаний за счет изменения тормозящего потенциала — потенциала на ЭДСУ. На основе экспериментальных данных показана возможность увеличения



**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований. *a* — зависимость величины технического КПД  $\eta_T$  (1), выходной мощности  $P$  (2) и электронного КПД  $\eta_e$  (3) от величины коэффициента торможения электронного пучка  $K$ ; *b* — зависимость величины токопрохождения  $K_b$  (1) и ширины полосы генерации от величины коэффициента торможения электронного пучка  $K$ .

ширины полосы и изменения спектра генерируемых колебаний посредством увеличения тормозящего потенциала. Отметим, что в представленном генераторе может достигаться достаточно высокий уровень выходной мощности — порядка 17 W, при этом значения электронного и технического КПД также высоки (16 и 24% соответственно).

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 (2009–2020 годы)“ (РНП 2.1.1/235).

## Список литературы

- [1] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. В. 13. С. 1724.
- [2] *Калинин Ю.А., Филатов Р.А., Храмов А.Е.* // Письма ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 61–67.
- [3] *Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот / Под ред. Трубецкова Д.И., Короновского А.А., Храмова А.Е.* М.: Физматлит, 2009. Т. 2. С. 383.
- [4] *Афанасьев В.И., Лукин К.А., Ракитянский В.А.* // Радиофизика и электроника. Национальная академия Украины. 1997. Т. 2. № 1. С. 115–118.
- [5] *Пащенко А.В., Залкинд В.М., Лонин Ю.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 84–89.
- [6] *Калинин Ю.А., Лазерсон А.Г., Чемичев Г.В.* // Прикладные задачи нелинейной теории колебаний и волн. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3. № 4. С. 32–39.
- [7] *Алямовский И.В.* // Интенсивные электронные потоки. М., 1991.