

10;12

## Генератор широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний на турбулентных электронных пучках

© Ю.А. Калинин, Л.Н. Волкова

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: noios@sgu.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2010 г.

Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования генератора хаотических СВЧ-колебаний на турбулентных электронных пучках. Показано, что в электронных пучках, формируемых магнитными полями с большой амплитудой и периодом, образуются сгустки пространственного заряда. Установлено, что увеличение амплитуды и периода магнитного поля приводит к возникновению генерации в системе шумоподобных широкополосных колебаний.

Известны конструкции низковольтных виркаторов [1–3], которые являются генераторами хаотических СВЧ-колебаний. Основными недостатками таких генераторов являются малая интегральная СВЧ-мощность (100–200 мВт) и малый КПД порядка 0.1–0.15%. Представляется интересным поиск конструкций, в которых эти недостатки отсутствуют.

Отличительной особенностью предлагаемого нами устройства является использование в нем турбулентных электронных пучков. Турбулентный электронный пучок состоит по длине из отдельных сгустков (групп электронов), и его можно рассматривать как ток, содержащий высшие гармонические составляющие. Такой пучок называется сгруппированным или промодулированным. Сгруппированный электронный пучок при определенных условиях может излучать электромагнитные колебания с частотами, равными частотам гармоник тока пучка. В электронном сгустке, как в части пространства, где имеется электрический заряд, создается собственное потенциальное поле — кулоновское поле пространственного заряда. Это поле может быть разложено на продольную и поперечную составляющие.

Силы продольного поля влияют на группировку электронов, увеличивая протяженность электронного сгустка. Поперечные силы поля стремятся расширить пучок в поперечном направлении. Результаты экспериментальных исследований интенсивных электронных пучков показывают, что в большинстве случаев такие пучки неламинарны [4]. В работе [5] теоретически уже исследован режим сложной динамики пространственно-временных колебаний в интенсивных неламинарных электронных пучках, формируемых магнитными полями. В работе [4] показано, что магнитная фокусировка электронного пучка характеризуется параметром  $\alpha$ , который зависит от амплитуды и периода магнитного поля. Следовательно, увеличивая амплитуду или период магнитного поля, можно добиться возникновения турбулентности в электронном пучке.

В данной работе расчет непараксиальных неламинарных траекторий пучка проводился на основе решения уравнений движения по методике работы [4]. Предполагается, что пучок электронов является аксиально-симметричным. В модели электронный пучок разбивается на  $N$  заряженных слоев толщиной  $dr$ , вложенных друг в друга, каждый из которых заменяется бесконечно тонким заряженным цилиндром. Каждому цилиндру присваивается ток  $I_j$ . Решая уравнения движения, можно получить представление о форме траекторий пучка. Уравнения движения для  $j$ -го заряженного цилиндра в цилиндрических координатах имеют вид

$$\frac{d^2 r_j}{dt^2} - r_j \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = -\eta E_{r_j} - \eta \left( r_j \frac{d\theta}{dt} B_{z_j} \right),$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = -\eta E_{r_j} - \eta \left( -r_j \frac{d\theta}{dt} B_{r_j} \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

где  $z$ ,  $r$ ,  $\theta$  — продольная, поперечная и азимутальная координаты соответственно  $j$ -го заряженного цилиндра,  $\eta = e/m$  — удельный заряд электрона,  $e$  — заряд электрона,  $m$  — масса электрона,  $E_{r_j, z_j}$  — напряженность поля пространственного заряда в точке с координатой  $(r_j, z_j)$ ,  $B_{r_j, z_j}$  — индукция магнитного поля в точке с координатой  $(r_j, z_j)$ . Для подсчета напряженности электрического поля, созданного пространственным зарядом, нами используется теорема Гаусса, согласно которой

заряженные цилиндры имеют бесконечный продольный размер. Согласно этой теореме и условию осевой симметрии, отличной от нуля, будет только радиальная компонента вектора напряженности поля  $E_{r_j} \neq 0$ , тогда как  $E_{z_j} = 0$ . Поскольку напряженность поля пространственного заряда  $j$ -го заряженного цилиндра равна [2]

$$e_j = \frac{I_j}{2\pi\epsilon_0\sqrt{2\eta}U^{1/2}r} \quad \text{при } r \leq r_j,$$

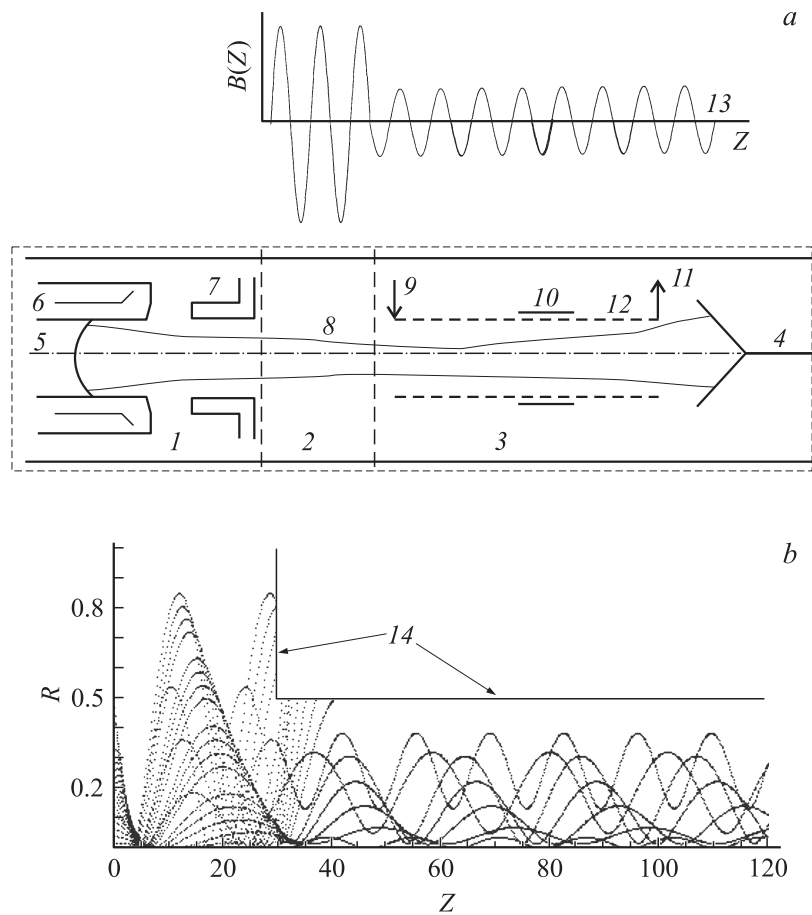
$$e_j = 0 \quad \text{при } r > r_j,$$

где  $I_j$  — ток  $j$ -го заряженного цилиндра,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная,  $U$  — ускоряющее напряжение, суммарная напряженность поля пространственного заряда имеет вид

$$E_{r_j}(r_j) = \sum_{j=1}^N e_j(r_j).$$

Описанная выше расчетная модель является приемлемой, поскольку в рассматриваемой нами задаче исследуется аксиально-симметричный электронный пучок. Данная модель является одной из возможных для описания электронных пучков с аксиальной симметрией. Численные расчеты показали, что данная модель позволяет качественно описать внутреннюю структуру турбулентного электронного пучка.

Нормировка поперечной координаты  $r$  производилась к радиусу трубы в области генерации  $R = r/r_{gen}$ , продольная координата нормировалась следующим образом:  $Z = 2\pi z/L$ , где  $L$  — период магнитного поля, а  $Z$  — соответственно нормированная координата. Система уравнений решалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка с шагом  $h = 0.01$ . Заметим, что теоретически электроны аксиально-симметричного пучка не могут пересекать ось, так как при подходе электронов к оси силы электрического расталкивания неограниченно возрастают. Чтобы сгладить подобную сингулярность, в нашей модели вводится приосевой слой толщиной  $\epsilon = 0.001$ . Если траектория попадает в этот слой, то знак ее тангенса угла наклона меняется на противоположный, и траектория тем самым отражается от оси. Такой метод сглаживания данной сингулярности является приемлемым в силу условия аксиальной симметрии пучка.

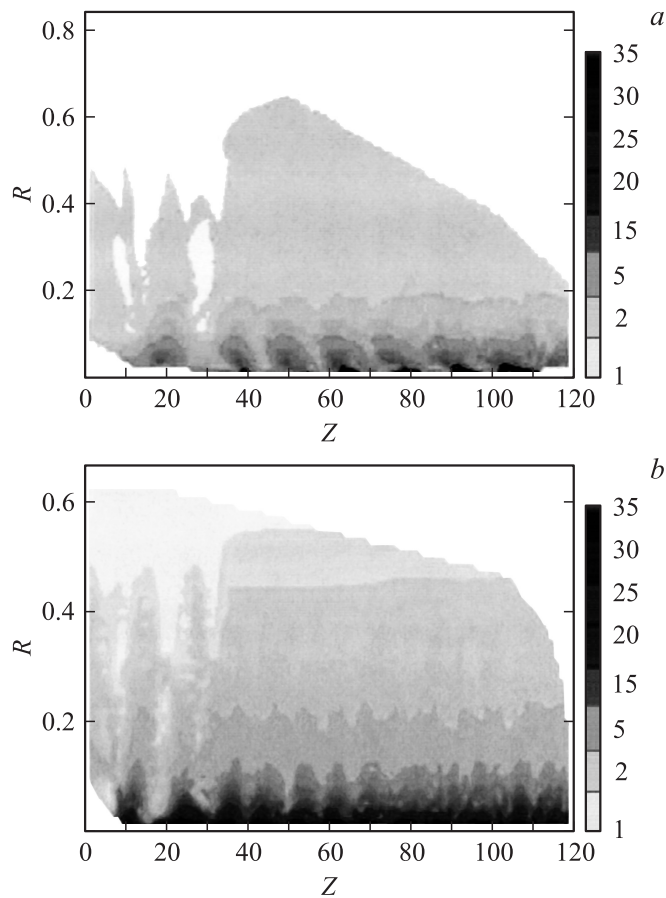


**Рис. 1.** *a* — схема исследуемой конструкции: 1 — секция электронной пушки; 2 — секция трансформации электронного пучка; 3 — секция усиления; 4 — коллектор; 5 — катод; 6 — система электродов; 7 — анод; 8 — электронный пучок; 9 — ввод энергии; 10 — поглотитель; 11 — вывод энергии (съемник энергии); 12 — электродинамическая система усиления; 13 — вид распределения магнитного поля вдоль оси генератора. *b* — вид траекторий электронов, проходящих через область трансформации и область усиления в неоднородном магнитном поле; 14 — граница трубы дрейфа.

В исследуемой конструкции (лампа бегущей волны — усилитель) можно выделить три области. Область формирования ламинарного пучка (электронная пушка 1 на рис. 1, *a*), область трансформации ламинарного пучка в турбулентный (модулятор электронного пучка 2 на рис. 1, *a*), область усиления (3, рис. 1, *a*). В генераторе пучок электронов поступает в область трансформации с периодическим магнитным полем, которое создает в пучке сгустки пространственного заряда. Возникающие в этой области СВЧ-колебания поступают в область усиления.

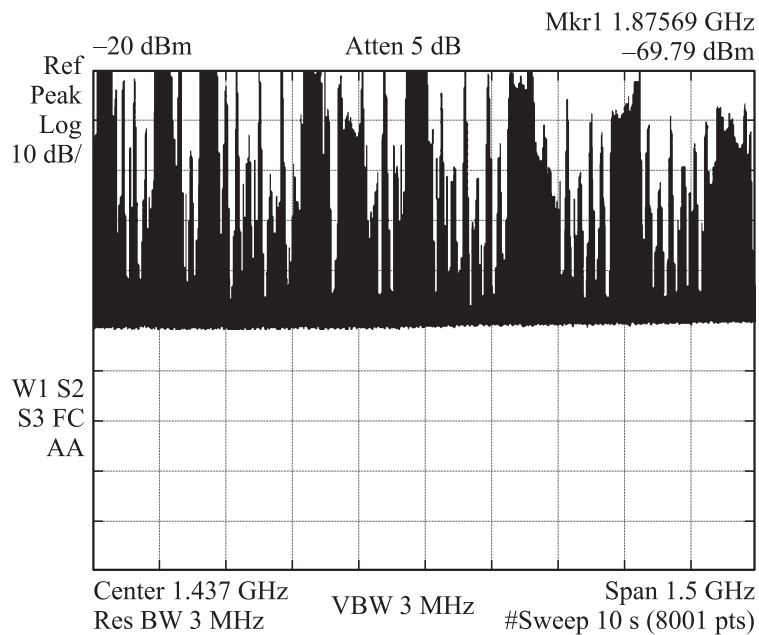
Параметры численной схемы были выбраны следующие: начальный радиус электронного пучка  $r_0 = 5$  мм, ускоряющее напряжение  $U = 1.5$  кВ, ток пучка  $I = 100$  мА, количество траекторий  $N$  в электронном пучке равно 20. Значение начальной амплитуды поля в области возбуждения и усиления составило 70 Gs, что в 2 раза больше брютлиеновского поля для данного случая, начальный период магнитного поля 20 мм. Радиус трубы в области генерации равен  $r_{gen} = 10$  мм, а радиус трубы в области усиления равен  $r_{ampl} = 5$  мм. На рис. 1, *b* представлены траектории электронов в безразмерных координатах. Амплитуда магнитного поля в данном случае выбиралась равной 800 Gs, период магнитного поля 20 мм. На рисунке хорошо прослеживается действие сильного магнитного поля на электронный пучок. Отчетливо видно, что при таком магнитном поле в пучке присутствуют области сильного сжатия и пересечения траекторий. На рис. 2, *a* и *b* для различных значений параметра магнитной фокусировки  $\alpha$  в градусах серого представлены распределения нормированной плотности пространственного заряда  $\rho/\rho_0$  по продольной и поперечной координатам, нормировка производилась к начальному значению плотности пространственного заряда  $\rho_0$ . Белые области на рисунке соответствуют  $\rho/\rho_0 < 1$ , черные области соответствуют максимальному значению  $\rho/\rho_0$ . На рис. 2, *a* значение  $\alpha = 0.2$ , а на рис. 2, *b* —  $\alpha = 3$ , изменения значения  $\alpha$  производились за счет увеличения амплитуды магнитного поля. Видно, что при  $\alpha = 3$  в распределении плотности пространственного заряда наблюдается значительно больше (чем при  $\alpha = 0.2$ ) областей, где  $\rho/\rho_0$  имеет максимальное значение.

В экспериментальном исследовании амплитуда магнитного поля изменялась от 500 до 700 Gs, а период от 10 до 60 мм. Установлено, что наличие большой амплитуды магнитного поля приводит к генерации



**Рис. 2.** Распределение (в градациях серого) нормированной плотности пространственного заряда  $\rho/\rho_0$  пучка по радиусу и продольной координате для различных значений параметра магнитной фокусировки:  $a$  —  $\alpha = 0.2$ ,  $b$  —  $\alpha = 3$ .

шумоподобных колебаний в системе. Характерный спектр колебаний при  $\alpha = 3$  приведен на рис. 3. Исследовались выходная мощность генерации и полоса частот генерируемого сигнала от параметра  $\alpha$ . Максимальная интегральная выходная мощность в генераторе составляла



**Рис. 3.** Спектр шумоподобных СВЧ-колебаний, полученный при проведении экспериментальных исследований.

112 W, полос частот генерации  $\Delta f/f = 1.3$ , электронный КПД равнялся 10.8%, технический КПД — 13.2%.

Таким образом, в данной работе проведено численное и экспериментальное исследование генератора широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний на турбулентных электронных пучках. На основе экспериментальных данных установлено, что увеличение амплитуды и периода магнитного поля приводит к генерации в системе шумоподобных широкополосных колебаний. Отметим, что в представленном генераторе достаточно высок уровень выходной мощности, при этом значения электронного и технического КПД также высоки.

Авторы выражают благодарность к.ф.-м.н. А.В. Стародубову за ценные замечания и помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 08-02-00102-а, 10-02-00256-а и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (РНП 2.1.1/235).

## Список литературы

- [1] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 71–78.
- [2] *Алямовский И.В.* // Интенсивные электронные потоки. Уч. изд. М., 1991.
- [3] *Калинин Ю.А., Лазерсон А.Г., Чемичев Г.В.* // Изв. вузов. ПНД. 1995. Т. 3. № 4. С. 32–39.
- [4] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.