

РАДИОФИЗИКА

УДК 533.9

ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ВО ВСТРЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ С ВИРТУАЛЬНЫМИ КАТОДАМИ

© 2013 г.

Р.А. Филатов, А.Е. Храмов

Саратовский госуниверситет им. Н. Г. Чернышевского

filatovra@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2012

В рамках численного моделирования методом крупных частиц была исследована нестационарная динамика виртуальных катодов, формирующихся во встречных интенсивных электронных потоках. Обнаружен широкий диапазон динамических режимов колебаний виртуальных катодов: от регулярных до широкополосных хаотических. Показана связь между характером колебательного режима и мощностью выходного сигнала системы встречных электронных потоков.

Ключевые слова: встречные электронные потоки, виртуальный катод, выходная мощность, пространственно-распределенная система.

Введение

Одними из важных направлений исследований современной радиофизики и электроники больших мощностей являются изучение и анализ нелинейных колебательных процессов в интенсивных электронных пучках со сверхкритическим током в режимах формирования нестационарного колеблющегося виртуального катода [1–5]. Сложная колебательная динамика в таких системах возникает в результате развития различных неустойчивостей, среди которых особый интерес вызывают аперiodические неизлучательные неустойчивости Пирса и Бурсиана [6–8], приводящие к формированию виртуального катода (ВК) в интенсивном пучке со сверхкритическим током. При этом наблюдается отражение части электронов от ВК обратно к плоскости инжекции, и установление, таким образом, двухпотокового состояния электронного пучка. В данных режимах нестационарный ВК может совершать сложные пространственно-временные колебания, включая хаотические осцилляции [9–14]. Важность исследования пучково-плазменных систем с ВК определяется как тем, что для таких приборов и устройств характерны сложные нестационарные режимы пространственно-временных колебаний, образование электронных структур, хаотическая

генерация, так и прикладными задачами использования электронных потоков с нестационарным ВК для создания генераторов мощного СВЧ излучения и систем ускорения ионов [3, 5, 15]. Генераторы на ВК или виркаторы характеризуются рекордными мощностями выходного излучения в сантиметровом диапазоне длин волн, простотой конструкции и возможностью работать без внешних фокусирующих магнитных систем, что делает данные системы перспективными источниками мощного СВЧ излучения в электронике больших мощностей [16]. Перспективным является и использование схемы низковольтного виркатора для генерации широкополосного микроволнового излучения среднего уровня мощности [17–19].

Как было сказано выше, формирование ВК приводит к реализации в пучково-плазменной системе состояния со встречными электронными потоками. Взаимодействие встречных электронных потоков представляет интерес с точки зрения построения фундаментальной теории колебательных процессов в интенсивных электронных потоках, возникающих под влиянием полей пространственного заряда [20, 21]. Кроме того, нелинейные нестационарные процессы во встречных электронных потоках являются самостоятельным предметом исследования во многих областях современных радиофизики и

физики плазмы, в том числе и при изучении процессов в астрофизической плазме, в частности, солнечного ветра [22, 23]. Проблема взаимодействия интенсивных встречных потоков заряженных частиц привлекает внимание исследователей и с точки зрения различных приложений в электронике, например изучение высокоэнергетических релятивистских двухпотоковых клистронов [24], создание источников терагерцового излучения на основе двухлучевых ламп [25, 26].

Исследования встречных электронных потоков со сверхкритическим током в режиме формирования ВК также заслуживает отдельного внимания. В настоящее время были получены экспериментальные результаты по исследованию синхронизации в системах с виртуальными катодами, формирующимися во встречных пучках [27], а также нерелятивистских генераторов широкополосного СВЧ излучения [28]. Также следует упомянуть исследования сжатого состояния электронных потоков с образованием так называемого распределенного ВК [29, 30]. Детальных теоретических исследований колебательных процессов во взаимопроникающих потоках заряженных частиц, тем не менее, не проводилось.

Настоящая работа посвящена изучению хаотических режимов колебаний виртуальных катодов, формирующихся во встречных взаимопроникающих электронных потоках в виркаторе без внешнего фокусирующего пучка магнитного поля.

Математическая модель и схема численного моделирования

Рассмотрим систему, а также дадим краткое описание модели, которая использовалась для исследования нестационарных процессов в системе встречных электронных потоков. Численная схема и программа для моделирования базировались на схеме, детально описанной в работах [31, 32].

Исследуемая система генератора на встречных электронных потоках представляет собой проводящий отрезок цилиндрической волноводной системы длиной L и радиусом R , закрытый с торцов сеточными электродами. Цилиндрический волновод является пространством дрейфа для встречных аксиально-симметричных моноскоростных электронных пучков, инжектируемых с одинаковыми по модулю начальными скоростями, плотностями пространственного заряда и радиусами r_b в пространство дрейфа навстречу друг другу че-

рез левую и правую сетки. Отработанные пучки выводятся через противоположные электроды, а также могут оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Плотность и скорость электронных потоков при инжекции в систему поддерживаются постоянными. Для исследования процессов формирования виртуальных катодов в системе была рассмотрена самая простая конфигурация электростатических полей в «холодном» режиме. Боковая стенка системы и сеточные электроды находятся под одинаковым потенциалом, т.е. электронные потоки изначально инжектируются в эквипотенциальное пространство и динамика электронов определяется только собственными полями пространственного заряда электронных пучков.

Как уже отмечалось, перспективной особенностью генераторов на ВК (виркаторов) является возможность работы без фокусирующего электроны магнитного поля [16], поэтому численное моделирование проводилось для системы без фокусирующих внешних магнитных полей.

С увеличением тока электронных пучков под действием сил пространственного заряда в области между сетками формируются два колеблющихся ВК. Пространственно-временные колебания ВК приводят к возбуждению высокочастотных электромагнитных колебаний в пространстве дрейфа. Наиболее удобным методом регистрации колебаний ВК является использование широкополосного вывода мощности, который можно реализовать с помощью отрезка спирали, размещаемого в области формирования ВК [18, 19]. В данной работе вывод мощности осуществлялся при помощи двух отрезков спиральной замедляющей системы, расположенных на правом и левом концах пространства взаимодействия, что позволяет регистрировать колебания пространственного заряда каждого ВК.

Моделирование самосогласованных нестационарных процессов во встречных электронных потоках проводилось методом крупных частиц [33–35] в двумерном приближении. Электронные потоки представляются в виде совокупности крупных частиц, которые в аксиально-симметричной геометрии представляют собой соосные кольца различного радиуса, инжектируемые через равные промежутки времени в пространство взаимодействия.

Задача взаимодействия встречных электронных потоков со сверхкритическим током рассматривалась в двумерном квазистатическом приближении, что требует самосогласованного

решения двумерных уравнений движения и Пуассона в предположении аксиальной симметрии системы. Единственный управляющий параметр исследуемой системы $\alpha = \sqrt{|\rho_0| / (V_0 \epsilon_0)} L$ – безразмерный параметр Пирса (критерий подобия задачи), пропорциональный току каждого пучка и длине системы ($\alpha \sim \sqrt{I} L$) и обратно пропорциональный начальной скорости инжектируемых электронов на входной сетке в пространство взаимодействия ($\alpha \sim 1/\nu$). Такое определение величины параметра Пирса выбрано сознательно для возможности сравнения величины параметра со случаем однопотокового виркатора. В настоящей работе рассматривается исключительно случай одинаковых токов встречных потоков, поэтому выбор такого определения параметра Пирса здесь представляется оптимальным. Следует отметить, что применимость потенциального приближения ограничена нерелятивистским случаем, когда можно пренебречь собственным магнитным полем электронного потока (см. подробнее оценки из работы [36], которые справедливы для рассматриваемой схемы).

Для моделирования вывода мощности с использованием спиральной системы использовался метод эквивалентных схем, детально описанный в работах [37, 38].

Результаты исследования нестационарной динамики виртуальных катодов в системе встречных электронных потоков

Рассмотрим характеристики выходного излучения системы встречных электронных потоков в нестационарном режиме. С ростом управляющего параметра a во встречных электронных потоках возникают нестационарные колеблющиеся ВК, колебания которых приводят к возбуждению электромагнитного излучения.

Критическое значение параметра Пирса $a_{cr} \sim 2.94$, при котором наблюдается переход к нестационарной динамике в системе встречных электронных потоков, гораздо ниже критического значения для однопотоковой системы $a_{cr0} \sim 4.77$.

На рис. 1 представлены временные реализации напряжения $U(t)$, снимаемого с конца левого отрезка спиральной замедляющей системы (рис. 1а-в), при различных значениях параметра Пирса, a и их спектральные функции (рис. 1г-е). Для анализа изменения характеристик выходного сигнала с ростом управляющего параметра можно ограничиться рассмотрением выходного сигнала только с одного вывода энергии, так как, несмотря на асимметрию, неизбежно возникающую в системе встречных электронных потоков и приводящую к различиям в мгновен-

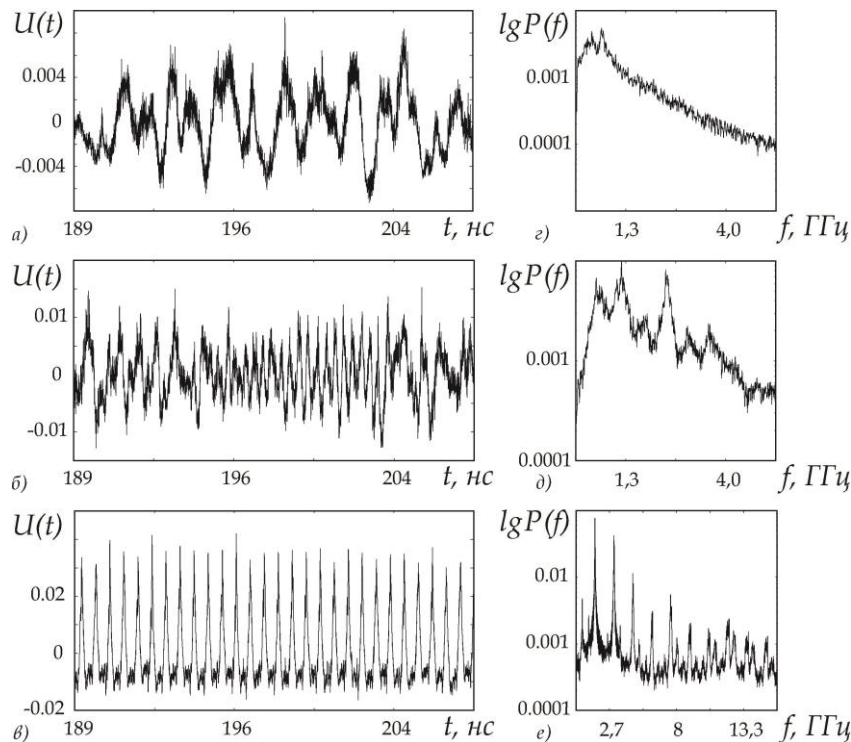


Рис. 1. Выходной сигнал (а-в) системы встречных электронных потоков, снимаемый с конца левого отрезка спиральной замедляющей системы и его спектральная функция (г-е) для различных значений управляющего параметра: а, г соответствуют $a = 4$; б, д – $a = 7.62$; в, е – $a = 8.62$.

ных распределениях, интегральные характеристики, как спектральная функция, и качественный вид колебаний в правой и левой половинах системы дают очень хорошее совпадение.

Расчет пускового тока двухпотоковой системы находится в хорошем соответствии с экспериментальным исследованием двухпотокового виркатора (проведенная нами оценка параметра Пирса, при котором в экспериментальной системе наступает генерация, дает величину $a_{cr} \sim 2.82$) [28].

При малых значениях параметра a (рис. 1 *a, z*) в системе встречных электронных потоков наблюдается низкочастотная генерация с малой амплитудой. Спектр колебаний (см. рис. 1*z*) близок к шумовому без явно выраженной доминантной частоты. С ростом параметра Пирса растет амплитуда и колебания становятся более детерминированными. На рис. 1*б, д* приведены временная реализация выходного сигнала $U(t)$ с конца левого отрезка спиральной замедляющей системы и его спектр, построенные при значении параметра $a = 7.62$. Можно видеть, что по сравнению с меньшими значениями ($a=4$, рис. 1*a, z*) в спектре сигнала к низкочастотной добавляются отдельные высокочастотные составляющие, спектр становится более широкополосным. При данном значении управляющего параметра a в системе наблюдаются хорошо развитые хаотические колебания. Дальнейший рост плотности пространственного заряда приводит к установлению режима регулярных колебаний виртуальных катодов в системе встречных электронных потоков. Из рис. 1*в, e* видно, что дальнейшее увеличение параметра Пирса a приводит к росту амплитуды высокочастотных составляющих, спектральная функция сигнала становится ближе к дискретному эквидистантному спектру с большим количеством старших гармоник.

Проанализируем изменение мощности выходного излучения системы встречных электронных потоков при изменении управляющих параметров системы.

На рис. 2 представлены зависимости мощности выходного сигнала P при изменении величины параметра Пирса a для значения радиуса электронного потока $r = 0.1$. Величина выходной мощности рассчитывалась по выходному сигналу, снимаемому с конца левого отрезка спиральной замедляющей системы. Из рис. 2 видно, что зависимость выходной мощности исследуемой системы от величины параметра Пирса a , которая пропорциональна току электронного пучка, имеет сложный характер. Сле-

дует отметить, что характерными свойствами этой зависимости $P(a)$ является тенденция к росту мощности колебаний при увеличении параметра a , а также связь величины мощности с характером колебаний в системе. Так, из рис. 2 видно, что малые значения мощности P ($a = 7.62$) наблюдаются в системе для широкополосного хаотического сигнала (рис. 1*б, д*), а максимальная мощность, достигаемая при значении $a = 8.62$, соответствует более регулярным высокочастотным колебаниям пространственного заряда в системе встречных электронных потоков (рис. 1*в, e*).

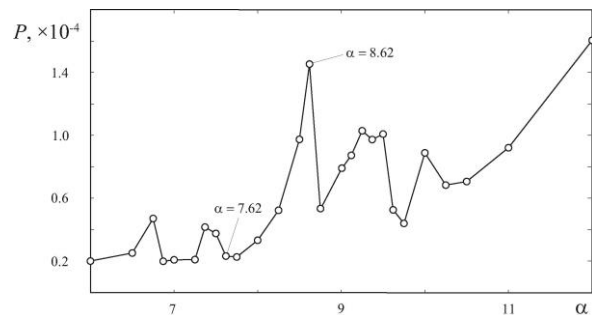


Рис. 2. Зависимости мощности выходного сигнала P , снимаемого с конца левого отрезка спиральной замедляющей системы, от параметра Пирса a для величины радиуса электронных пучков $r_b = 0.1$

Заключение

В рамках численного моделирования были исследованы характеристики колебаний пространственного заряда в системе встречных электронных потоков в режиме формирования ВК. Показано, что при различных значениях токов пучков двухпотоковый виркатор демонстрирует широкий спектр колебательных режимов от близких к регулярным до широкополосных хаотических колебаний.

Обнаружена связь между характером колебательного режима и мощностью выходного сигнала, снимаемого с конца отрезка спиральной замедляющей системы, а именно, наибольшая мощность выходного сигнала наблюдается для наиболее регулярных режимов колебаний пространственного заряда в системе встречных электронных потоков. Было показано, что мощность не растет монотонно с увеличением тока пучка, а достигает максимума при некотором его оптимальном значении. Подобная зависимость позволяет изменением тока электронных пучков эффективно управлять характеристиками выходного излучения в исследуемой системе.

В заключение отметим преимущества двух-

потоковой схемы генератора на ВК по сравнению с классической однопотоковой схемой виркатора. Во-первых, существует возможность снижения пускового тока данного генератора на двух электронных пучках; во-вторых, двухпотоковая схема характеризуется более сложными хаотическими режимами генерации по сравнению с классическим низковольтным режимом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-02-31035 мол_а, 12-02-00345 и 12-02-90022) и Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг. (контракт № 14.В37.21.0247).

Список литературы

1. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф. и др. Генерация мощного СВЧ излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 6. С. 321.
2. Granatstein V.L., Alexeeff I. High Power Microwave sources. Artech House Microwave Library, 1987.
3. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.
4. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
5. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. М.: Физматлит, 2003.
6. Бурсиан В.Р., Павлов В.И. Об одном частном случае влияния объемного заряда на прохождение потока электронов в пустоте // Журн. русского физико-химического общества. 1923. Т. 55, № 1. С. 71–80.
7. Pierce J.R. Limiting currents in electron beam in presence ions // J. Appl. Phys. 1944. V. 15. P. 721.
8. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
9. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. К вопросу о механизме возникновения хаотической динамики в вакуумном СВЧ генераторе на виртуальном катоде // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. XLI, № 9. С. 1137–1146.
10. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. Исследование колебаний в электронном потоке с виртуальным катодом в виркаторе и виртоде // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7, № 2, 3. С. 33–55.
11. Привезенцев А.П., Фоменко Г.П. Сложная динамика потока заряженных частиц с виртуальным катодом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 56.
12. Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью – виртод // Физика плазмы. 1993. Т. 19, № 4. С. 530.
13. Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-приборов с виртуальным катодом // Физика плазмы. 1994. Т. 20, № 7, 8. С. 689.
14. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. Numerical study of chaotic oscillations in the electron beam with virtual cathode in the external non-uniform magnetic fields // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 3057–3066.
15. Рухадзе А.А., Столбцов С.Д., Тараканов В.П., Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 3. С. 385.
16. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
17. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И. и др. Вакуумные генераторы широкополосных хаотических колебаний на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Т. 69, № 12. С. 1724.
18. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // Физика плазмы. 2005. Т. 31, № 11. С. 1009–1025.
19. Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2, Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
20. Marocchino F., Lapenta G., Evstatiev E.G. et al. Two-dimensional electron-electron two-stream instability of an inertial electrostatic confinement device // Phys. Plasmas. 2006. V. 13, № 10. P. 102106.
21. Nebel R.A., Stange S., Park J. et al. Theoretical and experimental studies of kinetic equilibrium and stability of the virtual cathode in an electron injected inertial electrostatic confinement device // Phys. Plasmas. 2005. V. 12, № 8. P. 100146.
22. Gaelzer R., Ziebell L.F., Vinas A.F. et al. Asymmetric solar wind electron superthermal distributions // The Astrophysical Journal. 2008. V. 677. P. 676.
23. Ryu C.-M., Ahn H.-C., Rhee T. et al. Simulation of asymmetric solar wind electron distributions // Phys. Plasmas. 2006. V. 16. P. 062902.
24. Uhm H.S. A theory of two-stream instability in two hollow relativistic electron beams // Phys. Fluids B: Plasma Physics. 1993. V. 5, № 9. P. 3388–3398.
25. Carlsten B.E., Bishofberger K.A., Faehl R.J. Compact two-stream generator of millimeter- and submillimeter-wave radiation // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. № 7. P. 073101.
26. Zong-Jun S., Xiao-Pin T., Zi-Qiang Y. et al. Simulations of a two-stream backward-wave oscillator with a slot-hole structure // Chinese Physics B. 2012. V. 21, № 1. P. 018401.
27. Hendricks K.J., Adler R., Noggle R.C. Experimental results of phase locking two virtual cathode oscillators // J. Appl. Phys. 1990. V. 68, № 2. P. 820–828.
28. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Сверхнизковольтный генератор хаотических СВЧ-колебаний на встречных электронных пучках // Письма в ЖТФ.

2011. Т. 37, № 1. С. 32–39.

29. Дубинов А.Е., Ефимова И.А. Колебания сжатого состояния электронных пучков в виркаторе на встречных потоках // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 8, № 11 12. С. 55–57.

30. Барабанов В.Н., Дубинов А.Е., Лойко М.В. и др. Пучковый разряд, возбуждаемый распределенным виртуальным катодом // Физика плазмы. 2012. Т. 38, № 2. С. 189–199.

31. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др. Программный пакет для исследования и оптимизации нелинейных нестационарных процессов в микроволновых генераторах с электронной обратной связью // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 1. С. 3–18.

32. Куркин С.А., Короновский А.А., Егоров Е.Н. и др. Математическая модель и ее численная реализация для исследования и оптимизации генераторов с электронной обратной связью // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18, № 6. С. 106–137.

33. Anderson T.M., Mondelli A.A., Levush B. et al.

Advances in modelling and simulation of vacuum electron devices // Proceedings IEEE. 1999. V. 87, № 5. P. 804–839.

34. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma physics, via computer simulation. NY: McGraw-Hill, 1985.

35. Хокни Р., Иствуд Д. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.

36. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейная динамика и хаотизация колебаний виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 8. С. 684.

37. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А. и др. Исследование мощности СВЧ генерации в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 9. С. 71–78.

38. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование зависимости мощности СВЧ-генерации низковольтного виркатора от управляющих параметров // ЖТФ. 2007. Т. 77, № 10. С. 139–142.

CHAOTIC OSCILLATIONS IN THE COUNTERSTREAMING ELECTRON BEAMS WITH VIRTUAL CATHODES

R.A. Filatov, A.E. Hramov

Virtual cathode non-stationary dynamics has been numerically studied for the two counterstreaming electron beams. The variety of the virtual cathode oscillatory regimes has been discovered from regular to wide band chaotic oscillations. Connection between oscillating regime and output signal power has been revealed.

Keywords: counterstreaming electron beams, virtual cathode, output power, spatially distributed system.