

Анализ когерентных структур, формирующихся в винтовом электронном потоке в режиме сжатого состояния

Е. Н. Егоров^{1,*}, В. В. Макаров^{1,2,†}, А. Е. Храмов^{1,2‡}

¹Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра электроники, колебаний и волн. Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.

²Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина, НОЦ «Нелинейная динамика сложных систем». Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

Представлены результаты численного моделирования и анализа нестационарной динамики винтового электронного потока в виркаторе с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки с дополнительным торможением электронов. Выявлены области управляющих параметров, где реализуется сжатое состояние в такой системе, проанализированы особенности динамики пучка в сжатом состоянии. С помощью разложения Карунена-Лоэва проанализированы процессы возникновения и распространения в пучке в сжатом состоянии волн пространственного заряда.

PACS: PACS: 41.75.-i, 05.45.-a. УДК: 533.9.

Ключевые слова: винтовые пучки, математические модели, моделирование, оптимизация, электронный поток с виртуальным катодом.

Исследование сложной нестационарной динамики в интенсивных электронных пучках с виртуальным катодом (ВК) представляет собой актуальную задачу современной радиофизики и электроники. Исследование систем с ВК представляет фундаментальный интерес: они способны демонстрировать разнообразную хаотическую динамику, турбулентность и образование диссипативных электронных структур [1, 2]. Очевидно также их прикладное значение как перспективных генераторов мощного СВЧ излучения на основе ВК (виркаторов) [3, 4]. В прикладном плане можно отметить также работы по ускорению заряженных частиц с помощью колеблющегося ВК [4] и созданию источников широкополосного шумоподобного излучения различного уровня мощности [5].

Целью данной работы является численное исследование нестационарных нелинейных процессов, включая динамический хаос и процессы образования и взаимодействия когерентных структур, в нерелятивистском электронном пучке с ВК, находящимся в сжатом состоянии. Отметим, что подобные системы с ВК при торможении электронного потока могут представить значительный интерес в качестве источников шумоподобного широкополосного хаотического сигнала среднего уровня мощности в СВЧ диапазоне [5], поэтому их теоретическое и экспериментальное исследование имеет важное практическое значение.

Напомним, что сжатое состояние пучка (ССП) характеризуется высокой плотностью и малой кинетической энергией электронов потока [6–8]. Формирование СПП может наблюдаться как в мощных системах

пучково-плазменной электроники с релятивистскими электронными пучками, так и в низковольтных системах. В режиме формирования СПП в пучке наблюдается сложная, вплоть до хаотической, собственная динамика частиц потока. Также режим СПП характеризуется возникновением и взаимодействием отдельных ансамблей заряженных частиц в потоке [9].

В качестве модели для исследования нестационарной динамики пучка в режиме СПП использовалась модель низковольтного виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Математическая модель описывающая систему представляет собой 2,5-мерную самосогласованную систему уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона [10]. Магнитное поле в МИП в области катода пушки имеет конфигурацию магнитной ловушки. Основными управляющими параметрами системы являются безразмерный управляющий параметр α , пропорциональный корню квадратному из тока пучка и эквивалентный параметру Пирса и тормозящая разность потенциалов $\Delta\varphi$, которая вводится в пространстве дрейфа для увеличения первеанса пучка. Численное моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса для моделирования процессов в генераторах с электронной обратной связью, подробно описанного в работе [10]. Описание системы в квазистатическом приближении в безразмерных параметрах позволяет распространить результаты моделирования на случаи от нерелятивистских до слаборелятивистских систем с винтовыми пучками.

Обсудим результаты моделирования данной системы. В области отражающего электрода при превышении тормозящей разности потенциалов $\Delta\varphi$ некоторого критического значения в трубе дрейфа образуется ВК. Вследствие отражения частиц от ВК, а также ограничивающего поперечные движения частиц магнитного поля, между ВК и катодом пушки устанавливается

*E-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com

†E-mail: vladmak404@gmail.com

‡E-mail: hramovae@gmail.com

ся двухпотокное состояние. В результате накопления пространственного заряда в этой области устанавливается сжатое состояние.

Предыдущие исследования (см. например, [9]) показали, что в сжатом состоянии в пучке частиц прослеживаются низкочастотные колебания потенциала пространства дрейфа, которые объясняются продольной динамикой заряженных частиц в пучке. Траекторный анализ показывает, что в данном режиме продольных колебаний заряда, в пучке не возникает пространственно локализованных сгустков электронов. Возникновение колебаний потенциала в системе определяется тем, что в прикатодной области возникают возмущения плотности заряда пучка, которые затем движутся вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда.

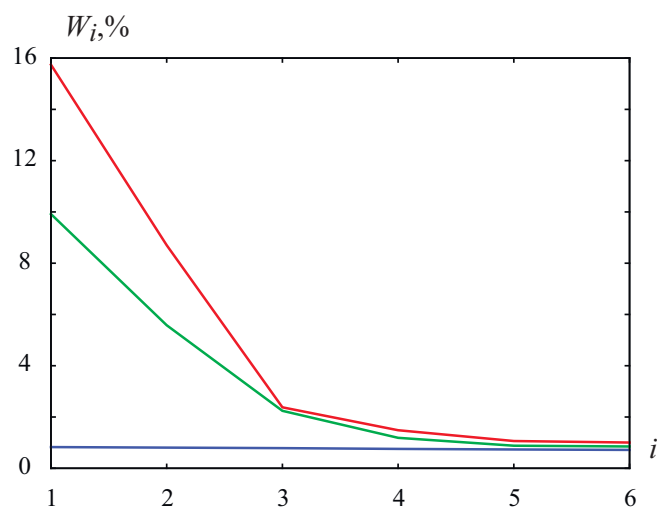


Рис. 1: Зависимость энергии КЛ-мод W_i от номера моды i , построенные при $\alpha = 1,6$: кривая 1 соответствует тормозящему потенциалу $\Delta\varphi = 1,3$; кривая 2 — $\Delta\varphi = 1,5$; кривая 3 — $\Delta\varphi = 1,7$. Масштаб по горизонтальной оси логарифмический

Рассмотрим физические процессы в электронном пучке в сжатом состоянии. Для этого воспользуемся методом анализа сложной динамики распределённых систем, основанном на методе ортогональной декомпозиции пространственно-временных данных с по-

мощью разложение Карунена–Лоэва (КЛ) (подробно смотри описание метода в работах [11, 12]). Говоря о применении этого метода к анализу сложного поведения ВК в пучке заряженных частиц, можно говорить о существовании в электронном потоке отдельных пространственно–временных структур, имеющих собственные характерные пространственные распределения и временные масштабы в электронном пучке, взаимодействие между которыми позволяет объяснить особенности поведения пучка с ВК в целом.

Характерной особенностью динамики пучка в сжатом состоянии является то, что энергии колебаний ВК сосредоточена в основном в нескольких первых КЛ-модах (см. рис. 1, кривые 2 и 3). В случае, когда ССП отсутствует, или слабо выражено, энергия колебаний мод распределена примерно равномерно по всему спектру мод (рис. 1, кривая 1). Фактически это означает, что в сжатом состоянии в пучке присутствует одна-две основные электронные структуры, которые полностью определяют динамику потока в целом. Остальные моды создают незначительный шумовой фон для колебаний основных структур.

На рис. 2 приведено распределение в пространстве собственных векторов $\Psi_1(z)$ и $\Psi_2(z)$ двух первых КЛ-мод. Видно, что значительные отличия собственных векторов наблюдаются только в прикатодной области, в остальной области пространства дрейфа распределения мод близки. Как было сказано выше, в прикатодной области возникают возмущения плотности заряда пучка, которые затем движутся вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда. Именно эти возмущения описывает распределение КЛ-мод в пространстве (рис. 2). Соответственно колебания этих мод определяют спектральный состав колебаний потенциала пространства дрейфа в области пучка.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ (№№ 14-02-31149-мол_а, 12-02-00345, 12-02-33071 и 13-02-90406), а также Президентской программы поддержки молодых российских учёных (МК-818.2013.2 и МД-345.2013.2).

[1] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. (М.–Ижевск: РХД, 2000).
 [2] Walgraef D. Spatio-temporal pattern formation. (N.Y.: Springer-Verlag, 1996).
 [3] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Радиотехника и электроника. **37**, № 3. С. 385. (1992).
 [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Радиотехника и электроника. **47**, № 6. С. 575. (2002).
 [5] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. Физика плазмы. **31**, № 11. С. 1009. (2005).

[6] Ignatov A.M., Tarakanov V.P. Phys. Plasmas. **1**, No. 3. P. 741. (1994).
 [7] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. ФЭЧАЯ. **35**, № 2. С. 462. (2004).
 [8] Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М., Дубинов А.Е., Макаров И.В., Садовой С.А., Сайков С.К., Тараканов В.П. Физика плазмы. **35**, № 1. С. 61. (2009).
 [9] Egorov E.N., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Hramov A.E. Plasma Physics Reports. **39**, No. 11. P. 925. (2013).

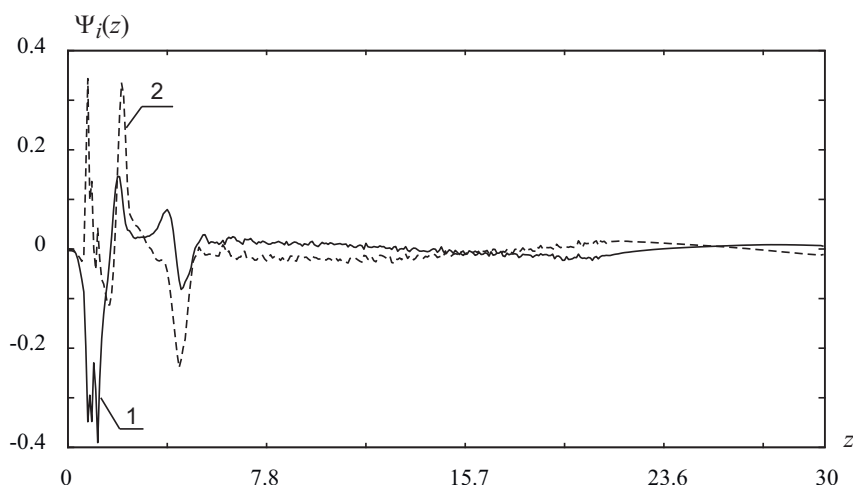


Рис. 2: Распределение в пространстве собственных векторов $\Psi_i(z)$ для первой (обозначена 1) и второй (обозначена 2) КЛ-мод

- [10] Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н., Короновский А.А., Филатов Р.А. Математическое моделирование. **23**, № 1. С. 3. (2011).
- [11] Ватанабе С. Разложение Карунена–Лоэва и факторный анализ. Теория и приложения, Автоматический анализ сложных изображений (под редакцией Э.М. Браверма-

- на, М.: Мир, 1969). 310 с.
- [12] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Лёвин Ю.И., Храмов А.Е. Радиотехника и электроника. **51**, № 11. С. 51. (2006).

Analysis of coherent structures in helical electron beam in the regime of the squeezed state

E. N. Egorov^{1,a}, V. V. Makarov^{1,2,b}, A. E. Hramov^{1,2,c}

¹Department of Electronics, Oscillations and Waves, Faculty of Nonlinear Processes, Tchernyshevskiy N.G. Saratov State University. Saratov 410012, Russia

²Scientific and educational center «Nonlinear dynamics of complex systems», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov, 410054, Russia

E-mail: ^aevgeniy.n.egorov@gmail.com, ^bvladmak404@gmail.com, ^chramovae@gmail.com

The results of numerical simulations and analysis of non-stationary dynamics of helical electron beam in the vircator with magnetron injection gun with additional braking field are presented. We have revealed the fields of the control parameters where the squeezed state is realized in such system. Peculiarities of the dynamics of the beam in squeezed state are analyzed. By means of Karhunen–Louve decomposition the processes of appearance and propagation in the beam in squeezed state of the space-charge wave are analyzed.

PACS: 41.75.-i, 05.45.-a.

Keywords: helical beam, mathematical models, simulation, optimization, electronic beam with virtual cathode.

Сведения об авторах

1. Егоров Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: 8(452) 51-42-94, e-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com.
2. Макаров Владимир Владимирович — аспирант; тел.: 8(452) 51-42-94, e-mail: vladmak404@gmail.com.
3. Храмов Александр Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник; тел.: 8(452) 99-85-47, e-mail: hramovae@gmail.com.