

УДК 533.9:621.373

## АНАЛИЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ВИНТОВОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

© 2014 г. Е. Н. Егоров<sup>1</sup>, В. В. Макаров<sup>1,2</sup>, А. Е. Храмов<sup>1,2</sup>

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

Представлены результаты численного моделирования нестационарной динамики винтового электронного потока в системе с виртуальным катодом. С помощью метода ортогональной декомпозиции пространственно-временных данных с помощью разложения Карунена–Лоэва проанализированы особенности динамики пучка с отражательным виртуальным катодом и в сжатом состоянии.

DOI: 10.7868/S0367676514120047

### ВВЕДЕНИЕ

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].

Цель данной работы – численное исследование нестационарных нелинейных процессов образования и взаимодействия когерентных электронных структур в электронно-волновой низковольтной системе с виртуальным катодом. 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, 6], поэтому их теоретическое и экспериментальное исследование имеет важное практическое значение.

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”.

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина”.

### ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Исследование нестационарной динамики электронного потока с виртуальным катодом проводилось на примере низкочастотной электронно-волновой системы с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП). Электронный пучок, формируемый МИП, обладает высоким первеансом и высокими уровнем собственных шумов, что, как показали предыдущие исследования, делает МИП эффективным источником электронов для низковольтных систем с виртуальным катодом [6–8].

Напомним, что основными элементами МИП являются (см., например, [9]) катод и ускоряющий электрод, выполненные в виде соосных конусообразных электродов, вставленных один в другой. На катоде имеется эмитирующий пояс, опоясывающий катод вокруг оси. Благодаря наличию скрещенных статических электрического и магнитного полей в области катода, МИП формирует трубчатый винтовой электронный поток. ВК в такой системе образуется за счет введения дополнительного торможения пучка, которое способствовало повышению первеанса пучка.

Модель исследуемой системы представляет собой 2.5-мерную самосогласованную систему уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона (подробно модель описана в работах [8, 10]). Движение частиц потока моделировали с помощью метода крупных частиц (PIC-метод); уравнение Пуассона с помощью стандартного метода ближайших соседей (пятиточечная разностная схема). Система имеет два основных управляющих параметра:  $\alpha$  – безразмерный ток пучка,  $\Delta\phi$  – тормозящая разность потенциалов, определяемая разностью потенциалов. Статическое магнитное поле задавали аналитически, и оно имело конфигурацию магнитной ловушки. Таким обра-

зом, описание системы проводили в квазистатистическом приближении в безразмерных параметрах, что позволяет распространить результаты моделирования на случаи от нерелятивистских до слабoreлятивистских систем с винтовыми пучками.

Для описания физических процессов в электронном пучке с ВК использовали метод ортогональной декомпозиции пространственно-временных данных с помощью разложение Карунена–Лоэва (КЛ) [11–13]. 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.

Метод ортогональной декомпозиции заключается в решении интегрального уравнения Фредгольма второго рода следующего вида:

$$\int K(z, z^*)\Psi(z^*)dz^* = \lambda\Psi(z), \quad (1)$$

где  $K(z, z^*)$  – ядро уравнения, которое формируется следующим образом:

$$K(z, z^*) = \langle \xi(z, t)\xi(z^*, t) \rangle_T. \quad (2)$$

Здесь  $\langle \dots \rangle_T$  означает усреднение по времени. В качестве функций  $\xi(z, t)$  можно выбрать, предварительно приведенное к нулевому среднему пространственно-временное распределение любой физической величины, на основе которой предполагается анализировать поведение системы. В работе анализируется пространственно-временное распределение плотности пространственного заряда пучка  $\rho(z, t)$ , усредненное по радиусу потока. Решение исходного интегрального уравнения (1), с ядром (2), сформированным на основе пространственно-временного распределения плотности пространственного заряда  $\rho(z, t)$ , сводится к нахождению набора собственных чисел  $\lambda_n$  и собственных векторов  $\Psi_n$ , каждый из которых и будет определять  $n$ -ю КЛ-моду колебательного процесса. Величина  $\lambda_n$  пропорциональна энергии соответствующей моды, которую удобно рассматривать в нормированном виде:

$$W_n = \frac{\lambda_n}{\sum_i \lambda_i} \times 100\%. \quad (3)$$

Временную динамику отдельных КЛ-мод можно восстановить следующим образом:

$$A_i(t) = \int \xi(z, t)\Psi(z)dz. \quad (4)$$

Воспользуемся методом ортогональной декомпозиции по Карунену–Лоэву для анализа нелинейной динамики винтового пучка в сжатом состоянии.

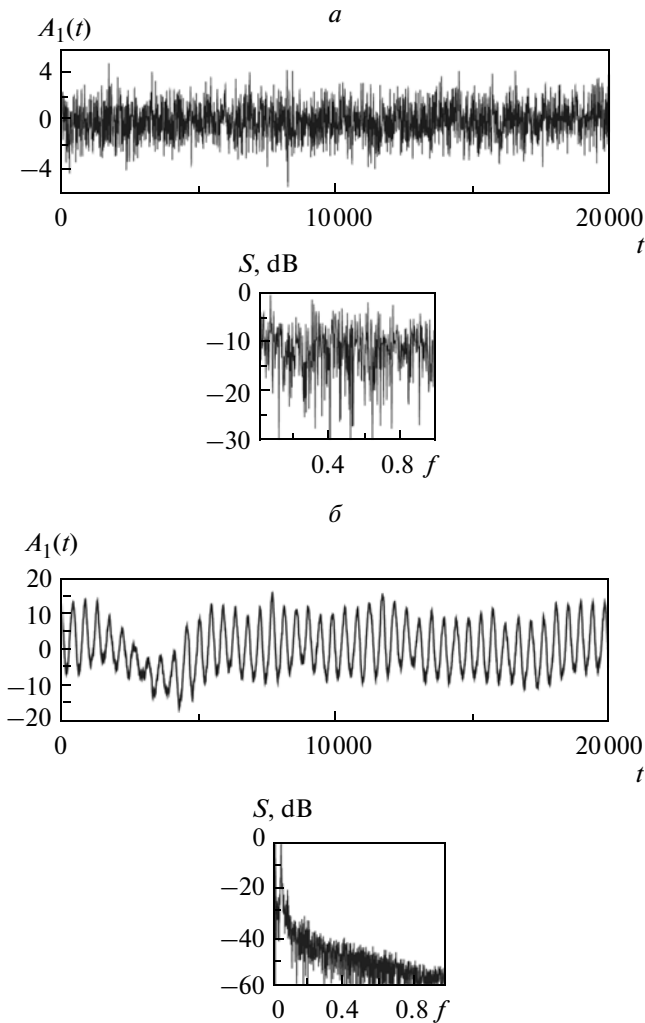
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обсудим результаты моделирования данной системы. В предложенной геометрии при выбранных значениях управляющих параметров, как было показано ранее [7, 8] в системе может реализоваться отражательный ВК (при малых величинах тормозящей разности потенциалов  $\Delta\phi$ ), или так называемое сжатое состояние пучка (ССП) [14–16], которое представляет собой распределенный в пространстве ВК и характеризуется высокой плотностью и малой кинетической энергией электронов потока [14]. При этом в режиме формирования СПП в пучке наблюдается сложная, вплоть до хаотической, собственная динамика частиц потока.

Предыдущие исследования (см., например, [8]) показали, что в сжатом состоянии в пучке частиц прослеживаются низкочастотные колебания потенциала пространства дрейфа. При этом в данном режиме колебаний заряда в пучке не возникают пространственно локализованные сгустки электронов. Возникновение колебаний потенциала в системе определяется тем, что в пучке возникают возмущения плотности заряда, которые имеют характер волн пространственного заряда.

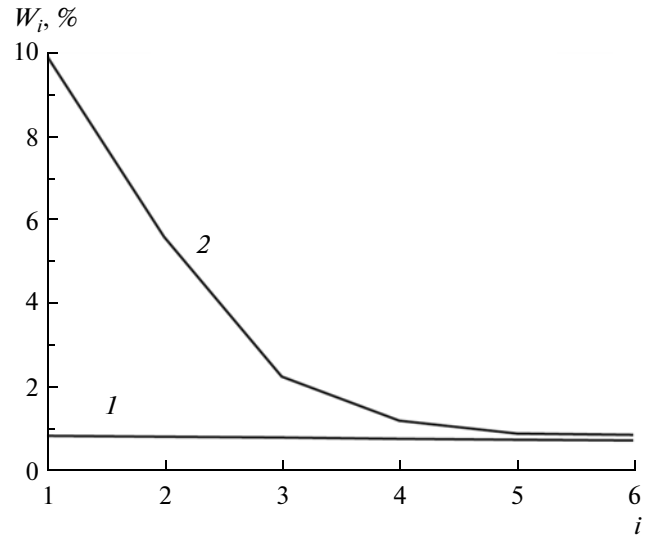
Как показал проведенный КЛ-анализ, возникновение сжатого состояния пучка соответствует возбуждению в потоке нескольких взаимодействующих КЛ-мод. На рис. 1 приведены временные реализации  $A_1(t)$  первых КЛ-мод (мод, на которые приходится максимальная энергия колебаний) и их спектров мощности для двух различных состояний пучка: отражательный ВК (рис. 1а) и СПП (рис. 1б). На рис. 1а видно, что временная зависимость колебаний первой КЛ-моды для пучка с отражательным ВК имеет относительно небольшую амплитуду, и спектр ее сильно зашумлен. Анализ КЛ-мод показал, что в режиме формирования отражательного ВК в пучке энергия колебаний достаточно равномерно распределена по всем модам. На рис. 2 зависимость энергии КЛ-мод  $W_i$  от номера моды  $i$  (для первых шести мод). Кривая 1 соответствует формированию в потоке отражательного ВК, кривая 2 – сжатому состоянию пучка. Видно, что энергия первой (основной) моды для пучка с отражательным ВК (кривая 1 на рис. 2) не превышает 1% соответственно, энергия всех остальных мод имеет меньшие значения.

Другая картина наблюдается для КЛ-мод в пучке в сжатом состоянии. Из рис. 1б видно, что первая КЛ-мода совершает близкие к периодическим колебания большой амплитуды. На спектре мощности (рис. 1а, справа) присутствует одна выраженная гармоника на шумовом фоне. Эта гармоника соответствует основной частоте колебаний потенциала пространственного заряда в пространстве дрейфа системы. Соответственно вторая

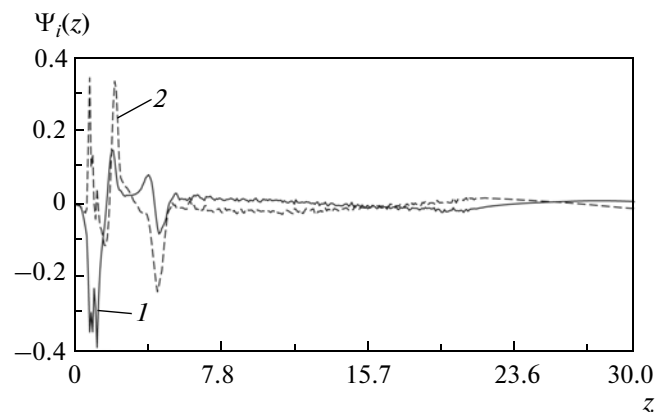


**Рис. 1.** Временные реализации  $A_1(t)$  (вверху) и спектры мощности колебаний (внизу) первых КЛ-мод:  $a$  – в системе с ВК,  $b$  – в системе с ССП.

и последующие КЛ-моды имеют меньшую амплитуду и иной характер пространственно-временной динамики. Из рис. 2 видно, что энергия основной КЛ-моды для пучка в сжатом состоянии (кривая 2) составляет около 10%. На вторую моду в этом случае приходится около 3% всей энергии колебаний. При этом в спектре сигнала в этом случае повышается уровень шумового пьедестала и появляются новые гармоники. Энергия последующих мод становится еще меньше, а их динамика носит все более шумовой характер. Таким образом, в случае, когда в пучке реализуется ССП, динамика потока полностью определяется двумя первыми КЛ-модами, которые описывают появление в пучке электронных структур – волн пространственного заряда. Остальные моды со-



**Рис. 2.** Зависимость энергии КЛ-мод  $W_i$  от номера моды  $i$ . Кривая 1 соответствует формированию в потоке отражательного ВК, кривая 2 – сжатому состоянию пучка.



**Рис. 3.** Распределение в пространстве собственных векторов  $\tilde{\Psi}_i(z)$  для первой (1) и второй (2) КЛ-мод.

здают незначительный шумовой фон для колебаний основных структур.

На рис. 3 приведено распределение в пространстве собственных векторов  $\tilde{\Psi}_1(z)$  и  $\tilde{\Psi}_2(z)$  двух первых КЛ-мод для пучка в сжатом состоянии. Видно, что значительные различия собственных векторов наблюдаются только в начале пространства дрейфа, в остальной области пространства дрейфа распределения мод близки. Можно сделать вывод, что именно колебания мод в этой области пространства дрейфа системы определяют возмущения плотности заряда пучка. Возникая в правой трети системы, эти возмущения плотности заряда затем распространяются вдоль пространства со скоростью волн пространственного заряда. Именно эти возмущения описывает распределение КЛ-мод в пространстве (рис. 3). Соответ-

ственно колебания этих мод определяют спектральный состав колебаний потенциала пространства дрейфа в области пучка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты численного моделирования нестационарной нелинейной динамики винтового электронного потока в электронно-волновой системе с виртуальным катодом.

Как показал анализ динамики пучка с помощью разложения Карунена–Лоэва, динамика потока полностью определяется динамикой первых двух (в зависимости от значений управляющих параметров) КЛ-мод, в которых сосредоточена основная доля энергии колебаний заряда пучка.

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 ученых (МК-818.2013.2 и МД-345.2013.2). Исследования проводились в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России (задание № 3.59.2014/К и проект 931 (СГТУ-146)).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves, CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
4. Dubinov A.E., Selemir V.D. // J. Commun. Technol. Electron. 2002. V. 47. № 6. P. 575.
5. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Кураев А.А., Колосов С.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 12. С. 1761; Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Kuraev A.A., Kolosov S.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 12. P. 1452.
6. Kalinin Yu.A., Koronovskiy A.A., Khramov A.E. et al. // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31. № 11. P. 938–952.
7. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Кураев А.А., Колосов С.В., Рак А.О., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2014. Т. 78. № 2. С. 233; Egorov E.N., Koronovskii A.A., Kuraev A.A., Kolosov S.V., Rak A.O., Hramov A.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. V. 78. № 2. P. 233.
8. Egorov E.N., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. et al. // Plasma Phys. Rep. 2013. V. 39. № 11. P. 925.
9. Tsimring S.E. Electron beams and microwave vacuum electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons Inc., 2007.
10. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н. и др. // Мат. моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3–18.
11. Ватанабе С. // Автоматический анализ сложных изображений / Под ред. Бравермана Э.М. М.: Мир, 1969. 310 с.
12. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 2, 3. С. 33.
13. Egorov E.N., Kalinin Yu.A., Koronovskii A.A. et al. // J. Commun. Technol. Electron. 2007. V. 52. № 1. P. 45.
14. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 3. P. 741.
15. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю. и др. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
16. Barabanov V.N., Dubinov A.E., Loiko M.V. et al. // Plasma Phys. Rep. 2012. V. 38. № 2. P. 189.