

Исследование влияния внешнего сигнала на динамику винтового электронного потока с виртуальным катодом

Е.Н. Егоров^{1,*}, А.Г. Петрик^{2,†}, А.Е. Храмов^{1,2,‡}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

(Статья поступила 24.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

В работе проводится исследование влияния внешнего гармонического сигнала на генерацию в низковольтном виркаторе, с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки. Показано, что в системе наблюдается явление классической синхронизации в распределённой электронно-волновой системе, а также показана возможность увеличения мощности выходного сигнала виркатора при изменении частоты внешнего сигнала.

PACS: 52.59.Mv УДК: 533.9

Ключевые слова: винтовой пучок, сжатое состояние, внешний сигнал, синхронизация, численное моделирование, магнетронно-инжекторная пушка.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование систем с виртуальным катодом (ВК) вызывает значительный интерес в связи с тем, что они способны демонстрировать сложную нелинейную динамику, в том числе хаотическую что связано с образованием и взаимодействием диссипативных электронных структур [1, 2]. Прикладное значение этих работ связано с тем, что подобные системы рассматриваются как перспективные генераторы шумового СВЧ излучения малого и среднего уровня мощности (генераторы с электронной обратной связью) [3, 4]. В настоящее время вызывает интерес возможность формирования сжатого состояния пучка (ССП) в системе с ВК. Впервые СПП было впервые обнаружено в двухсекционном виркаторе [5–7], также схожее состояние пучка было обнаружено и в низковольтных системах [8, 9]. Это состояние характеризуется высокой плотностью пространственного заряда и малой скоростью частиц пучка [8, 9]. Подобные системы при определённых условиях могут представлять интерес как перспективные усилительные приборы. В частности, проводились исследования, посвященные анализу влияния внешних сигналов на генерацию в системах с виртуальным катодом [10–12]. В силу динамической природы образования и колебаний ВК в пучке электронов [8, 9, 12, 13], существует возможность наблюдать в таких системах явление синхронизации. Развитие теории динамического хаоса вызвало новый интерес к проблеме синхронизации автоколебательных систем, демонстрирующих хаотическую динамику. К настоящему времени накоплен достаточно большой материал по теоретическому и экспериментальному изучению синхронного поведе-

ния автоколебательных систем, способных демонстрировать сложную хаотическую динамику [14].

В данной работе проводилось исследование влияния внешнего гармонического сигнала на генерацию в низковольтном виркаторе (НВ), с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП), пучок которой находится в так называемом сжатом состоянии [?]. В такой модификации возможно наблюдать не только явление классической синхронизации в распределённой электронно-волновой системе, но и изучить вопрос о влиянии внешнего сигнала на величину выходной СВЧ мощности низковольтного виркатора.

1. ИССЛЕДУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Численное моделирование исследуемой системы проводилось с помощью 2.5D-мерной математической модели, основанной на самосогласованной системе уравнений движения и уравнения Пуассона (квазистатистическое приближение) для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда [8, 9]. Моделирование динамики электронного потока проводилось методом крупных частиц (PIC-метод); интегрирование уравнения Пуассона проводилось с помощью стандартной пятиточечной сеточной схемы. При моделировании МИП учитывался максвелловский закон распределения полных тепловых скоростей инжектируемых электронов. Магнитное поле вводилось аналитически, таким образом, чтобы в области выхода пушки формировалась конфигурация магнитного поля в виде «магнитной пробки» — сгущения линий магнитного поля на оси системы. Образование ВК в такой системе достигается за счёт введения дополнительного тормозящего электрода.

Данная система исследовалась при воздействии на неё внешнего сигнала. В качестве внешнего воздей-

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

†E-mail: a.g.petrlik@gmail.com

‡E-mail: hramovae@gmail.com

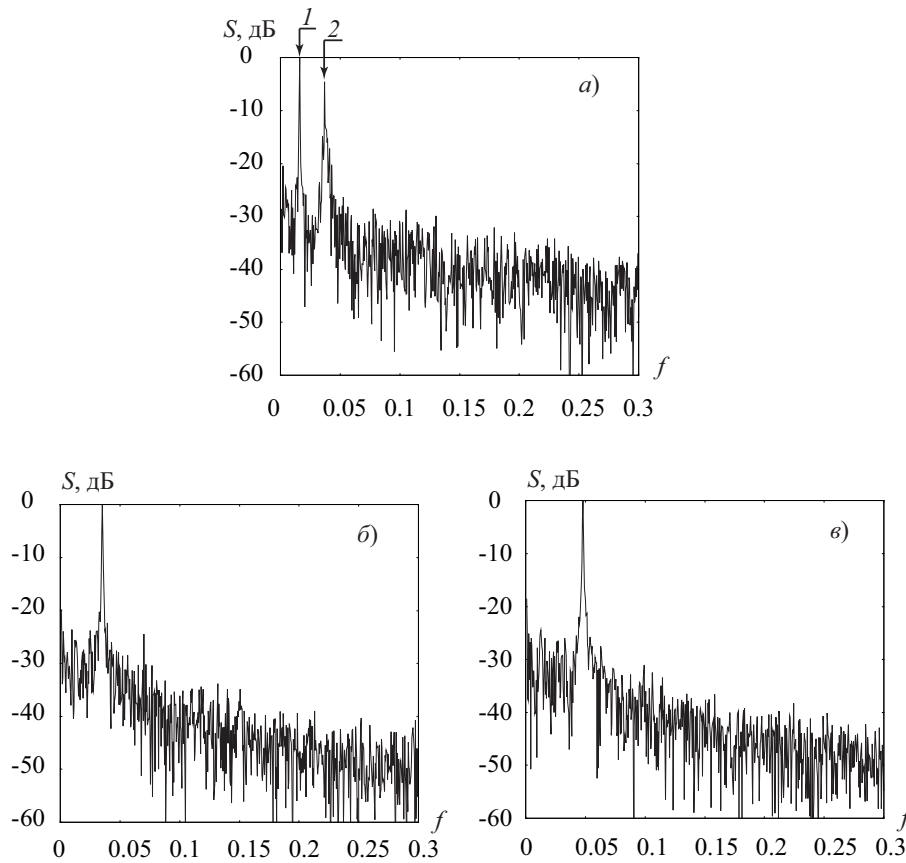


Рис. 1: Спектры мощности колебаний потенциала пространственного заряда пучка в пространстве дрейфа низковольтного виркатора, $sm = 0.3$, *a* — цифрой «1» обозначена частота внешнего воздействия $f_{vn} = 0.015$, цифрой «2» — собственная частота колебаний пучка $f_0 = 0.033$; *б* — $f_{vn} = 0.033$; *в* — $f_{vn} = 0.041$

ствия выступал гармонический сигнал вида

$$V_{vh} = sm \cdot \cos(2\pi f_{vn}t). \quad (1)$$

где sm — амплитуда модулирующего напряжения, f_{vn} — частота гармонического сигнала, t — время.

Ввод сигнала осуществляется с помощью короткого отрезка спирали, помещённой в область пучка вблизи катода пушки, потенциал которой модулировал скорость электронного потока. Соответственно этому представлению выбирался способ численного моделирования элемента ввода сигнала: спираль моделировалась с помощью эквивалентной длинной линии из последовательно соединённых индуктивностей L и ёмкостей C . Предполагалось, что пучок движется параллельно длинной линии (по оси спирали), в непосредственной близости к ней.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для начала кратко остановимся на результатах, полученных для автономной системы. Так, предыдущие исследования (например, [8, 9]) показали, что в низковольтной системе с интенсивным винтовым электрон-

ным пучком с дополнительным торможением в режиме образования ВК характерно распространение волн пространственного заряда в продольном направлении в сжатой части пучка. Возникновение этих волн в пучке, инициируется близкими к гармоническим колебаниями плотности пространственного заряда в области катода и «магнитной пробки», т.е. электроны пучка колеблются в потенциальной яме образованной катодом пушки и областью ССП, которая имеет пониженный потенциал пространства. Колебания этих частиц, в свою очередь, приводят к возникновению возмущений плотности пучка в области «магнитной пробки», которые движутся вдоль пространства дрейфа со скоростью волн пространственного заряда. Последнее подтверждается изменением скорости возмущения вдоль пространства дрейфа пучка: скорость распространения возмущения пространственного заряда в сжатой части, выше, чем в области, где отсутствует сжатое состояние пучка. В этом случае в спектре мощности появляется ярко выраженная спектральная компонента (по величине (в нормированных единицах) равная, примерно, $f = 0.033$, рис. 1). Эта частота (с некоторой отстройкой) была выбрана в качестве частоты внешнего воздействия f_{vn} .

Рассмотрим подробнее результаты численного моделирования воздействия на исследуемую систему внешнего гармонического сигнала.

Частота внешнего сигнала в ходе численного эксперимента изменялась в диапазоне от $f_{vn} = 0.015$ до $f_{vn} = 0.051$ (в нормированных единицах); амплитуда внешнего воздействия принимала значения sm 0.3; 0.5 и 0.7. В эксперименте регистрировались колебания потенциала пространства дрейфа (пространственного заряда пучка), по которому вычислялась мощность колебаний по формуле:

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t, x_0) dt. \quad (2)$$

Здесь T — длина временной реализации, x_0 — точка в пространстве дрейфа в которой снимался сигнал.

На рис. 1 приведены спектры мощности колебаний потенциала пространственного заряда пучка. Каждому рисунку соответствуют разные частоты внешнего воздействия: *a* — $f_{vn} = 0.015$; *б* — $f_{vn} = 0.033$; *в* — $f_{vn} = 0.041$. Как видно на рис. 1, *a*, при большой отстройке частоты внешнего сигнала от частоты собственных колебаний в пучке (собственная частота колебаний системы $f_0 = 0.033$, обозначена цифрой «2», частота внешнего воздействия $f_{vn} = 0.015$, обозначена цифрой «1») в спектре наблюдаются две частоты: частота собственных колебаний и частота внешнего сигнала. При увеличении частоты внешнего сигнала, происходит захват частоты системой, в результате чего в спектре мощности преобладает единственная частота (рис. 1, *б*, *в*) — частота внешнего сигнала. Последнее можно объяснить явлением синхронизации колебаний пучка внешним сигналом. Действительно, на рис. 2, *a* приведена зависимость частоты собственных колебаний винтового пучка с ВК от частоты внешнего воздействия при амплитуде модуляции $sm = 0.3$. Отчётливо видно, что при частоте внешнего сигнала f_{vn} в диапазоне $[0.027; 0.041]$ колебания потенциала в пучке происходят на частоте внешнего воздействия, следовательно, происходит синхронизация колебаний в пучке внешним сигналом.

На рис. 2, *б* приведены рассчитанные численно границы синхронизации для трёх значений амплитуды внешнего сигнала: $sm = 0.3; 0.5$ и 0.7 . Кроме того, пунктирными линиями указаны границы синхронизации для промежуточных значений величины амплитуды внешнего сигнала. Видно, что границы формируют характерную форму клюва синхронизации [1].

Явление синхронизации в данной системе можно объяснить тем, что происходит фазировка (подстройка фазы колебаний) частиц [15], колеблющихся в области катода, в результате чего их колебания синхронизируются внешним сигналом, и, соответственно, меняется частота и скорость распространения возмущений пространственного заряда.

Также в работе рассчитывалась зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа в за-

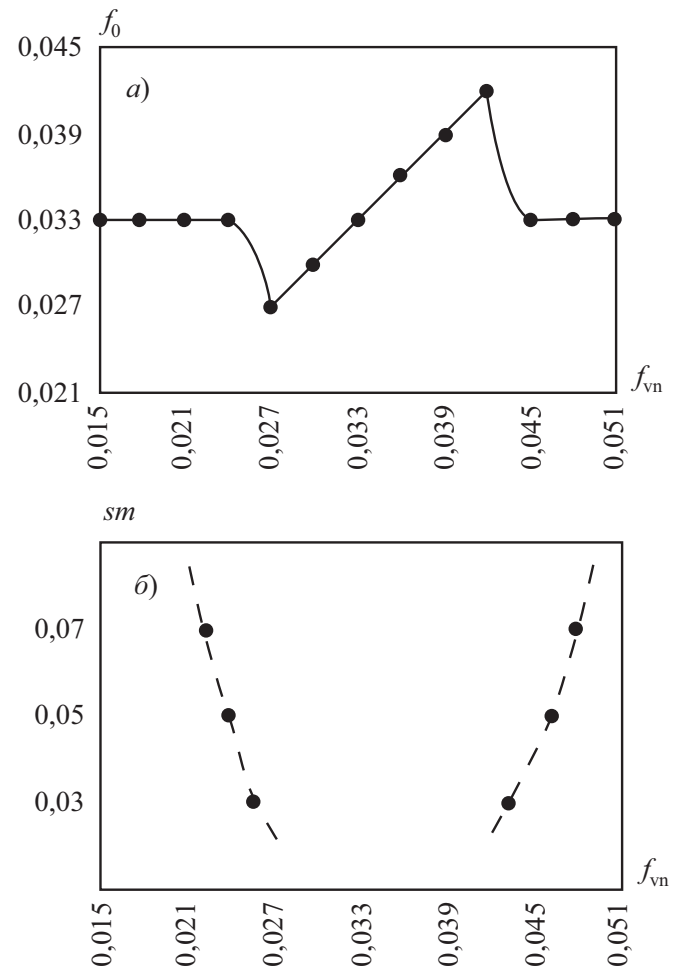


Рис. 2: Зависимость частоты собственных колебаний винтового пучка с ВК от частоты внешнего воздействия (*a*), амплитуда модуляции $sm = 0.3$; границы зоны синхронизации колебаний в пучке внешним сигналом для трёх значений амплитуды внешнего сигнала (*б*), точки — численный расчёт, пунктирные линии — примерные границы зон синхронизации вне расчётного диапазона

висимости от частоты внешнего воздействия. Необходимо отметить, что особенности динамики потока в режиме ССП таковы, что в разных частях пучка может реализовываться различная динамика например, [8, 9]), и, соответственно, в спектре сигнала может наблюдаться различный спектральный состав. В частности, при значениях параметров, которые были выбраны для данных исследований, преобладающей частотой является частота $f_0 = 0.033$. Она проявляется в разных частях системы с различной интенсивностью. На рис. 3 приведена зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа для точки пространства дрейфа, находящейся близи тормозящего электрода (ближе к выходному концу системы, где наблюдаются колебания пространственного заряда пучка в сжатом состоянии) для трёх значений амплитуды внешнего воздействия: $sm = 0.3; 0.5$ и 0.7 . Видно, что

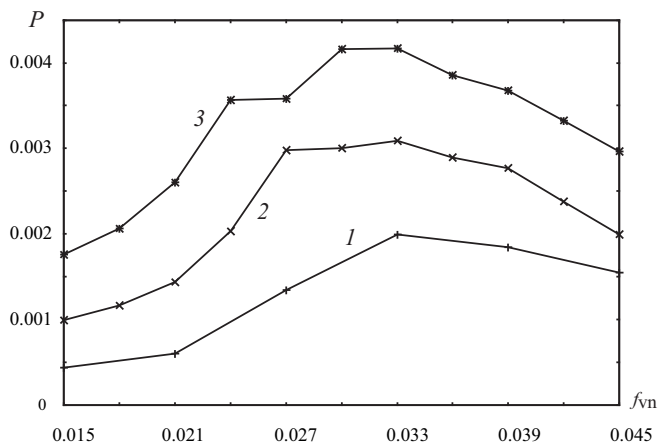


Рис. 3: Зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа для точки пространства дрейфа, находящейся в тормозящем электроде, для трёх значений амплитуды внешнего воздействия. Цифрами обозначены кривые: 1 – $sm = 0.3$; 2 – $sm = 0.5$; 3 – $sm = 0.7$

зависимости имеют характерный вид кривой с одним максимумом, который приходится на частоты близкие к собственной частоте колебаний электронного потока $f_0 = 0.033$. Нужно отметить, что подобные зависимости были получены ранее в работах, посвящённых исследованию пучка с ВК под внешним гармоническим воздействием [11, 12], однако в предыдущих исследо-

ваниях рассматривался пучок, в котором не реализовывалось сжатое состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан механизм синхронизации колебаний плотности пространственного заряда в пучке с ВК, находящимся в режиме ССП. Показано также, что зависимость мощности колебаний пучка от частоты имеет вид кривой с одним максимумом.

Одним из важных выводов, который можно сделать на основании обнаруженного эффекта синхронизации является то, что сложные колебания пространственного заряда ССП носят динамический характер, а не являются следствием шумовых колебаний электронов пучка. Кроме того, интересным является результат, полученный по зависимостям мощности от частоты внешнего воздействия. На них прослеживается эффект резонансного взаимодействия пучка с полем. Изучение этого вопроса может позволить в дальнейшем создать приборы с эффективным механизмом управления выходной мощностью колебаний, вместе с тем данный вопрос требует дополнительных исследований.

Исследования были выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания № 3.859.2017/4.6.

- [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. и др. Радиотехника и электроника. 1992. **37**, № 3. С. 385.
- [4] Дубинов А. Е., Селемир В. Д. Радиотехника и электроника. 2002. **47**, № 6. С. 575.
- [5] Ignatov A. M., Tarakanov V. P. Phys. Plasmas. 1994. **1**, N 3. P. 741.
- [6] Петрик А. Г., Куркин С. А., Короновский А. А., Храмов А. Е. Письма в ЖТФ. 2016. **42**, № 15, С. 43.
- [7] Dubinov A. E., Petrik A. G., Kurkin S. A. et al. Physics of Plasmas. 2016. **23**. 042105.
- [8] Egorov E. N., Koronovskii A. A., Kurkin S. A., Hramov A. E. Plasma Physics Reports. 2013. **39**, N 11. P. 925.
- [9] Egorov E. N., Koronovskii A. A., Kuraev A. A., Kolosov S. V., Rak A. O., Hramov A. E. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2014. **78**, N 2. P. 233.
- [10] Woo W., Benford J., Fittinghoff D. et al. J. Appl. Phys. 1989. **65**, N 2. P. 861.
- [11] Калинин Ю. А., Ремпен И. С., Храмов А. Е. Изв. РАН. Сер. физ. 2005. **69**, № 12. С. 1736. (Kalinin Ju. A., Rempen I. S., Hramov A. E. BRAS: Physics. 2005. **69**, N 12)
- [12] Калинин Ю. А., Храмов А. Е. Письма в ЖТФ. 2006. **32**, № 13. С. 88.
- [13] Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981
- [14] Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
- [15] Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. **2**. М.: Физматлит, 2004.

Study of influence of external signal on the dynamic of low-voltage system based on helical electron beams with virtual cathode

E. N. Egorov^{1,a}, A. G. Petrik^{2,b}, A. E. Hramov^{1,2,c}

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

²*Scientific 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, ^ba.g.petrik@gmail.com, ^chramovae@gmail.com*

The study of influence of external harmonic signal on generation in low-voltage vircator with magnetron-injection gun as source of electron beam are carried out. The classical phenomenon of synchronization in the distributed electron-wave system are observed. The possibility of vircator output signal power increasing with the frequency of external signal changing are shown.

PACS: 52.59.Mv

Keywords: helical beam, squeezed state, external signal, numerical simulation, synchronization, magnetron-injection gun.

Received 2017.

Сведения об авторах

1. Егоров Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com.
 2. Петрик Алексей Георгиевич — аспирант; тел.: (8452) 51-42-94, e-mail: a.g.petrik@gmail.com.
 3. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (8452) 99-85-47, e-mail: hramovae@gmail.com.
-