

Исследование влияния внешнего сигнала на динамику низковольтной системы на основе винтовых электронных потоков с виртуальным катодом

Е. Н. Егоров^{1,*}, А. Г. Петрик^{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 Гагарина Ю. А., Институт электронной техники и машиностроения, кафедра «Автоматизация, управление, мехатроника»
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

В работе проводится исследование влияния внешнего гармонического сигнала на генерацию в низковольтном виркаторе, с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки, пучок которой находится в так называемом сжатом состоянии. 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: 41.75.Cn.

УДК: 537.533.79.

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

Исследование сложной нестационарной динамики систем с виртуальным катодом (ВК) вызывает интерес исследователей в связи с тем, что они способны продемонстрировать разнообразную динамику, вплоть до хаотической, турбулентность и образование диссипативных электронных структур [1, 2]. Очевидно также их прикладное значение как перспективных генераторов шумового СВЧ излучения малого и среднего уровня мощности (виркаторов) [3, 4]. Ранее проводились исследования, посвященные анализу влияния внешних сигналов на генерацию в виркаторе [5–7]. В данной работе проводится 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 [8–10]. 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.

Численное моделирование процессов в низковольтном виркаторе с МИП под внешним гармоническим воздействием проводилось с помощью 2.5D-мерной математической модели, основанной на самосогласованной системе уравнений движения и уравнения Пуассона (квазистатическое приближение) для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда. Моделирование динамики электронного потока проводилось методом крупных частиц (PIC-метод); интегри-

рование 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 пушки формировалась конфигурация магнитного поля в виде «магнитной пробки». Образование ВК в такой системе достигается за счёт введения дополнительного тормозящего электрода.

Данная система исследовалась при воздействии на неё внешнего сигнала. В качестве внешнего воздействия использовался гармонический сигнал вида

$$V_{2E} = sm \cdot \cos(2\pi f_2 t), \quad (1)$$

где sm — амплитуда модулирующего напряжения, $f_{вн}$ — частота сигнала, t — текущее 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 моделирования обратной связи для предварительных исследований. 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.

Для начала кратко остановимся на результатах, полученных для автономной системы. Так, предыдущие исследования (например [9, 10]) показали, что в низковольтной системе с интенсивным винтовым электронным пучком с дополнительным торможением в режиме образования ВК характерно возникновение продольной динамики пространственного заряда. Возникновение

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

†E-mail: a.g.petrlik@gmail.com

‡E-mail: hramovae@gmail.com

продольных колебаний в системе определяется возникновением возмущений плотности пучка, которые возбуждаются колебаниями в области «магнитной пробки» и движутся вдоль пространства дрейфа со скоростью волн пространственного заряда. Последнее подтверждается изменением скорости возмущения вдоль пространства дрейфа 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 $f_{\text{вн}}$.

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

Частота внешнего сигнала в ходе численного эксперимента изменялась в диапазоне от $f_{\text{вн}} = 0.015$ до $f_{\text{вн}} = 0.051$ (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.

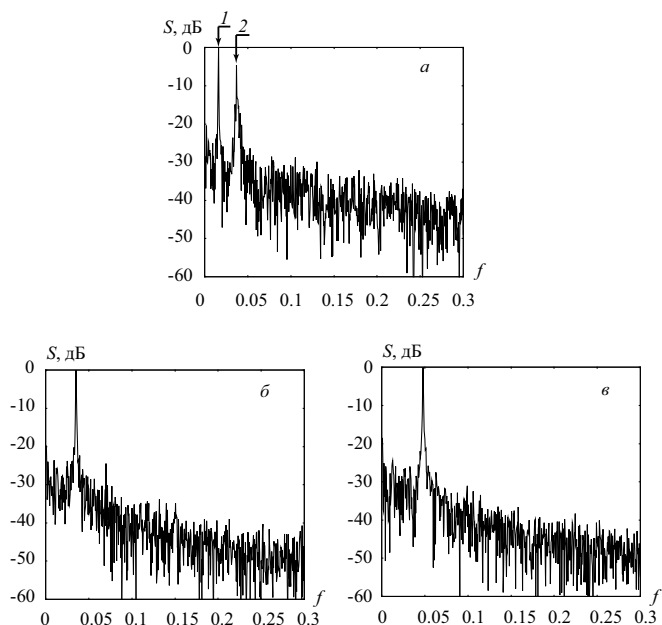


Рис. 1: Спектры мощности колебаний потенциала пространственного заряда пучка в пространстве дрейфа низковольтного виркатора, $sm = 0.3$, (а) $f_{\text{вн}} = 0.015$, (б) $f_{\text{вн}} = 0.033$, (в) $f_{\text{вн}} = 0.041$

На рис. 1 приведены спектры мощности колебаний потенциала пространственного заряда пучка. Каждо-

му рисунку соответствуют разные частоты внешнего воздействия: (а) $f_{\text{вн}} = 0.015$, (б) $f_{\text{вн}} = 0.033$, (в) $f_{\text{вн}} = 0.041$. Как видно из рисунков, при большой отстройке частоты внешнего сигнала от частоты собственных колебаний в пучке (собственная частота колебаний системы $f_0 = 0.033$, частота внешнего воздействия $f_{\text{вн}} = 0.015$) в спектре наблюдаются две частоты: частота собственных колебаний и частота внешнего сигнала (рис. 1а). При увеличении частоты внешнего сигнала происходит захват частоты системой, в результате чего в спектре мощности преобладает единственная частота (рис. 1б и в) — частота внешнего сигнала.

На рис. 2а 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 в диапазоне, примерно, $[0.027; 0.041]$ происходит синхронизация колебаний потенциала в пучке внешним сигналом, т.е. колебания потенциала в пучке происходят на частоте внешнего воздействия.

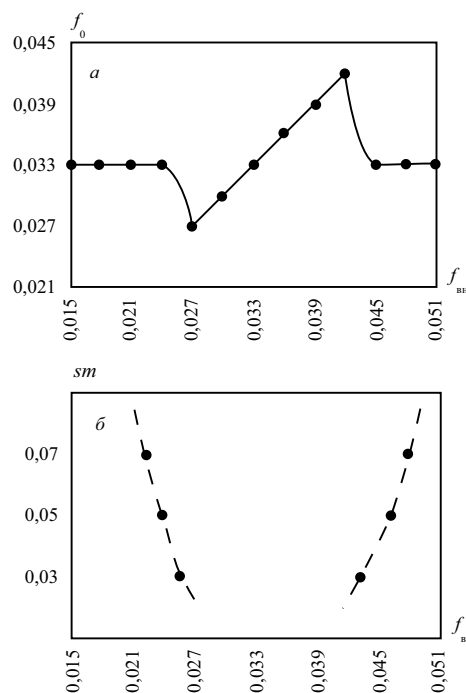


Рис. 2: Зависимость частоты собственных колебаний винтового пучка с ВК от частоты внешнего воздействия (а), амплитуда модуляции $sm = 0.3$; границы зоны синхронизации колебаний в пучке внешним сигналом для трёх значений амплитуды внешнего сигнала (б), точки — численный расчёт, пунктирные линии — примерные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

На рис. 2б приведены рассчитанные численно границы синхронизации для трёх значений амплитуды внешнего сигнала: $sm = 0.3$, 0.5 и 0.7 . Кроме того, пунктирными линиями указаны приблизительные границы синхронизации для промежуточных значений величины амплитуды внешнего сигнала. Видно, что гра-

ницы формируют характерную форму клюва синхронизации [11].

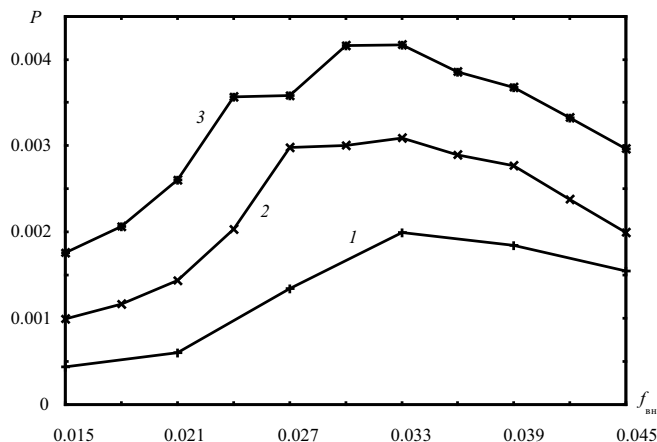


Рис. 3: Зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа для точки пространства дрейфа, находящейся в тормозящего электрода для трёх значений амплитуды внешнего воздействия

Также в работе рассчитывалась зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа в зависимости от частоты внешнего воздействия. Необходимо отметить, что значения потенциала можно снимать в различных точках пространства дрейфа рассматриваемой системы. При этом, геометрия пушки и особенности динамики потока в режиме ВК таковы, что в разных частях пучка может реализовываться различная динамика (например [9, 10]), и, соответственно, в спектре сигнала может наблюдаться раз-

личный 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 пучка с разной интенсивностью.

На рис. 3 приведена зависимость мощности колебаний потенциала пространства дрейфа для точки пространства дрейфа, находящейся близости тормозящего электрода (ближе к выходному концу системы) для трёх значений амплитуды внешнего воздействия: $st = 0.3, 0.5$ и 0.7 . Видно, что зависимости имеют характерный вид кривой с одним максимумом, который приходится на частоты близкие к собственной частоте колебаний электронного потока $f_0 = 0.033$.

Одним из важных выводов, который можно сделать на основании проведённых исследований является то, что явление синхронизации, которое наблюдается в неавтономном низковольтном виркаторе с винтовым пучком с ВК, подтверждает, что сложные колебания (вплоть до хаотических) в исследуемой системе 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, и, поэтому, этот вопрос требует дополнительных исследований.

Исследования были выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ (задание 3.59.2014/К в рамках проектной части).

-
- [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. **37**, № 3. С. 385. (1992).
- [4] Дубинов А. Е. Селемир В. Д. Радиотехника и электроника. **47**, № 6. С. 575. (2002).
- [5] Woo W., Benford J., Fittinghoff D. et al. J. Appl. Phys. **65**, № 2. P. 861. (1989).
- [6] Калинин Ю. А. и др. Изв. РАН. Сер. физ. **69**, № 12. С. 1736. (2005).
- [7] Калинин Ю. А., Храмов А. Е. Письма в ЖТФ. **32**, № 13. P. 88. (2006).
- [8] Ignatov A. M., Tarakanov V. P. Phys. Plasmas. **1**, N 3. P. 741. (1994).
- [9] Egorov E. N. et al. Plasma Physics Reports. 2013. **39**, N 11. P. 925. (2013).
- [10] Egorov E. N. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **78**, N 2. P. 233. (2014).
- [11] Рыскин Н. М., Трубецков Д. И. Нелинейные волны. М.: Наука. Физматлит, 2000.

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 named after Tchernyshevskiy N.G., 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, ^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 in squeezed state 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: 41.75.Cn.

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

Сведения об авторах

1. Егоров Евгений Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (452) 51-42-94, e-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.com.
2. Петрик Алексей Георгиевич — аспирант, тел.: (452)99-85-47, e-mail: a.g.petrik@gmail.com.
3. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (452) 99-85-47, e-mail: hramovae@gmail.com.