

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн  
наименование кафедры

**Ознакомление с работой магнетронно-инжекторной пушки и исследование**  
наименование темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом  
**влияния внешнего гармонического сигнала на динамику пучка в пушке.**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

студента 4 курса 421 группы

направления гр.421-011800.62 – радиоп физика

код и наименование направления

факультета нелинейных процессов

наименование факультета

Акатов Рустам Батюевич

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к. ф. - м. н.

должность, ученая степень, уч. звание

\_\_\_\_\_   
подпись, дата

Е.Н.Егоров

Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой (полное наименование кафедры)

профессор д.ф.-м.н.

должность, ученая степень, уч. звание

\_\_\_\_\_   
подпись, дата

Д.И.Трубецков

Инициалы Фамилия

Саратов 2016 г.

Содержание работы:

1. Введение
2. Основное содержание работы
3. Заключение
4. Список литературы

## Введение

Ознакомление с методами моделирования процессов в МИП; ознакомление с математической моделью описывающей процессы в МИП в двух пространственных измерениях, с учётом аксиальной симметрии пространства дрейфа.

Исследование сложной нестационарной динамики систем с виртуальным катодом (ВК) вызывает интерес исследователей в связи с тем, что они способны демонстрировать 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]. В настоящее время вызывает интерес возможность формирования сжатого состояния пучка (ССП) в системе с ВК. Впервые СПП было впервые обнаружено в двухсекционном виркаторе, также схожее состояние пучка было обнаружено и в низковольтных системах. Это состояние характеризуется высокой плотностью пространственного заряда и малой скоростью частиц пучка [8]. Подобные системы, при определённых условиях могут представлять интерес, как перспективные усилительные приборы. В силу динамической природы образования и колебаний ВК в пучке электронов [7], существует возможность наблюдать в таких системах явление синхронизации. Известно, что синхронизация автоколебательных процессов представляет собой одно из фундаментальных явлений, имеющих принципиальное значение для понимания широкого круга проблем современного естествознания [6]. 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 поведения автоколебательных систем, способных демонстрировать сложную хаотическую динамику [6].

Целью работы было ознакомление с математической моделью низковольтного виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки. Математическая модель была представлена в программной среде Delphi 2007.

Произвести расчеты и пронаблюдать за разными факторами влияющие на изменение поведения СВЧ-мощности низковольтного виркатора.

В работе представлены одна главы, в данной главе рассматривается формирования сжатого состояния пучка за счет дополнительного торможения электронов проводилось на примере низковольтного виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекторной пушки (МИП). И описывается численное моделирование исследуемой модели. Представлены расчеты и построены спектры мощности .

## Основное содержание работы

В данной работе использовалась магнетронно-энжекторная пушка(МИП). Выбор системы с МИП определен тем, что для формирования ССП необходимо сильное внешнее продольное магнитное поле, которое препятствует поперечному движению электронов пучка в сжатом состоянии и расширению пучка за счет сил пространственного заряда, что автоматически используется в электронно-оптической системе МИП. Математическая модель для описания формирования пучка с помощью МИП и динамики пространственного заряда винтового пучка представляет собой 2.5мерную самосогласованную систему уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона [6,7,8]. Уравнения движения заряженных частиц в присутствии электрического и магнитного полей в цилиндрической системе координат записывается в виде:

$$\begin{aligned}\frac{dP_r}{dt} - \frac{P_\theta^2}{r\gamma} &= E_r + \frac{P_\theta B_z}{\gamma} \\ \frac{dP_\theta}{dt} + \frac{P_\theta P_r}{r\gamma} &= \frac{P_z B_r}{\gamma} - \frac{P_r B_z}{\gamma} \\ \frac{dP_z}{dt} &= E_z - \frac{P_\theta B_r}{\gamma}\end{aligned}\tag{1}$$

Где  $\mathbf{P} = (P_r, P_\theta, P_z)^T = \gamma \mathbf{u}$ - вектор импульса частицы,  $\gamma$  – релятивистский фактор,  $\mathbf{E} = (E_r, 0, E_z)^T$

-вектор напряженности электрического поля,  $\mathbf{B} = (B_r, 0, B_z)^T$  – вектор индукции магнитного поля. В исследуемом случае рассматривается низковольтная схема виркатора, поэтому мы пренебрегаем собственными магнитными полями электронного потока, полагается, что  $\mathbf{B}_\theta = 0$ .

В системе уравнений (1) используются безразмерные величины: потенциал  $\phi$  электрического поля, плотность заряда  $\rho$ , пространственные координаты  $z$  и  $r$  и время  $t$ :

$$\begin{aligned}v' &= (2\eta V_0)^{1/2} u, \quad P' = m_e (2\eta V_0)^{1/2} P, \\ z' &= hz, \quad r' = hr,\end{aligned}$$

$$t' = \frac{t}{\eta B_0}, \quad \rho' = \rho_0 \rho, \quad V' = V_0 \varphi,$$

$$E' = (2\eta V_0)^{1/2} B_0 E, \quad B' = B_0 B.$$

Штрихом обозначены соответствующие размерные величины,  $\eta=e/m_e$ - удельный заряд покоящегося электрона,  $\rho_0$ - статическая плотность заряда на входе в пространство взаимодействия генератора.

С учетом аксиальной симметрии ( $d/d\Theta=0$ ) уравнение Пуассона в безразмерных переменных записывается в виде[6]:

$$\frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \alpha^2 \rho(z, r) \quad (2)$$

Где

$$\alpha = h \left( \frac{|\rho_0|}{V_0 \varepsilon_0} \right)^{1/2}$$

– безразмерный управляющий параметр, пропорциональный корню квадратному из тока пучка и эквивалентный параметру Пирса  $\alpha$  в теории диода Пирса – диэлектрическая постоянная вакуума. Граничные условия для уравнения Пуассона имеют вид:

$$\varphi_1 = 0,$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad \left. \frac{d\varphi}{dz} \right|_{z=L} = 0.$$

где  $\varphi_1$ ,  $\varphi_a$ , и  $\varphi_r$  -безразмерные потенциалы катода, анода (первой секции трубы дрейфа) и тормозящего электрода (второй секции трубы дрейфа),  $L$  – длина системы. Последнее условие системы соответствует открытому пространству на правой границе системы.

Разность потенциалов анода и тормозящего катода:

$$\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_r$$

Далее при изменении управляющих параметров ( $\alpha$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $f$ ,  $sm$ ) получаем результаты по которым строим спектры мощностей. На (рис.1.) наблюдается сжатое состояние пучка и ярко выраженная низкочастотная спектральная компонента. На(рис.2.) видно при увеличении частоты модуляции внешнего сигнала, происходит захват частоты системой, в результате чего в спектре мощности преобладает единственная частота – частота внешнего сигнала.

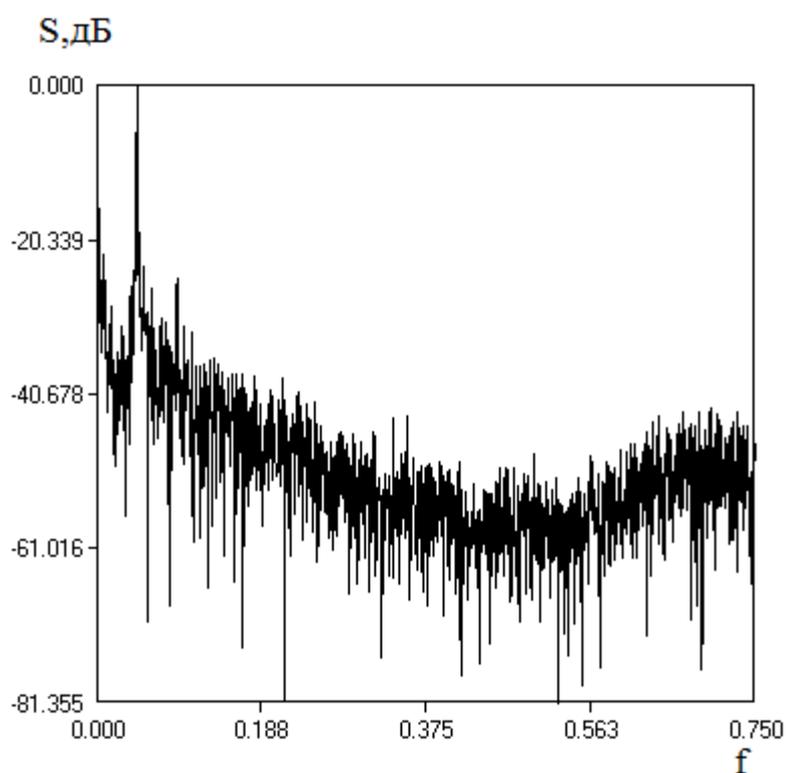


Рис 1. Спектры мощности для управляющих параметров ( $\alpha=1,4; \Delta\varphi=1,7$ ) при параметрах модуляции внешнего воздействия ( $sm=0,3; \omega=0,24$ ) и  $U_2$

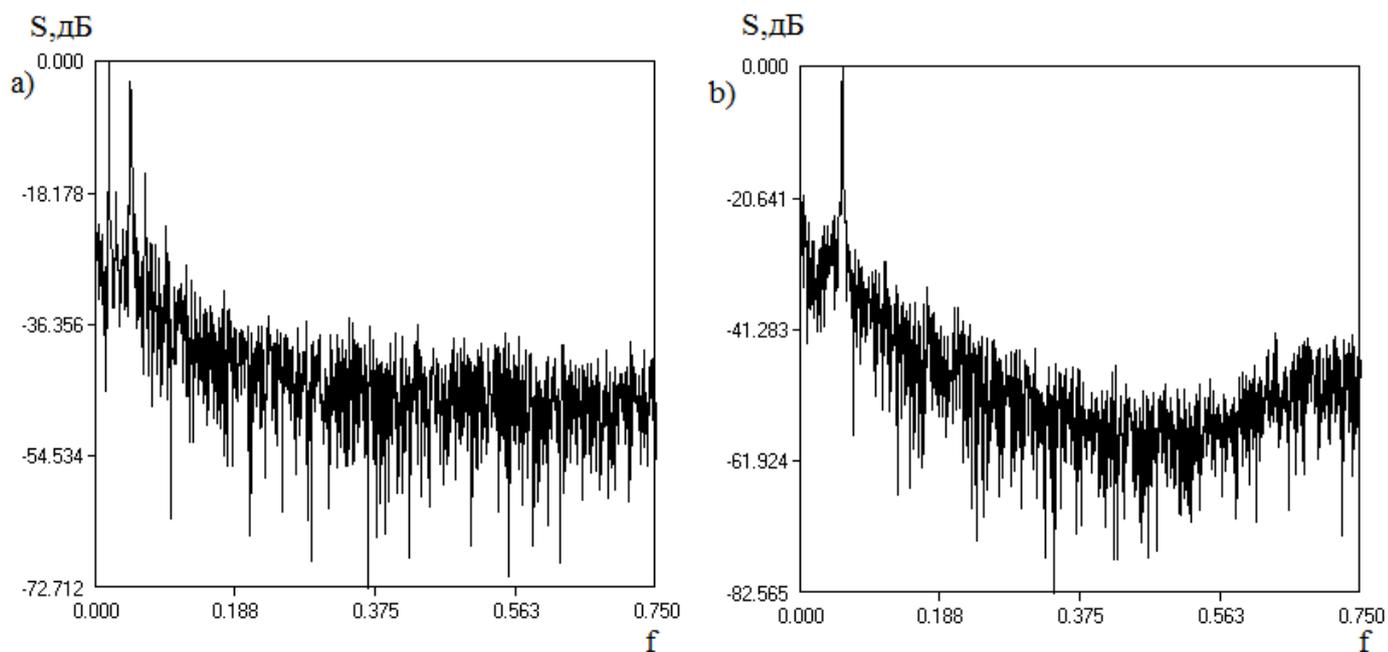


Рис. 2. Спектры мощности для управляющих параметров ( $\alpha=1,4; \Delta\varphi=1,7$ ) при параметрах модуляции внешнего воздействия: а- частота внешнего воздействия равна  $f=0,1$  ; б – частота внешнего воздействия равна  $f=0,3$ .

## **Заключение**

В данной работе была исследована математической моделью низковольтного виркатора с источником электронов в виде магнетронно-инжекционной пушки. Математическая модель была представлена в программной среде Delphi 2007. Были произведены расчеты и рассмотрены факторы влияющие на изменение поведения СВЧ-мощности низковольтного виркатора. Из данных расчетов видно, что интенсивность колебаний растет с ростом тормозящего потенциала или с ростом тока пуска. А также причиной возникновения низкочастотных колебаний в режиме ССП является продольная динамика в пучке. В расчетах с изменением частоты модуляции мы пронаблюдали захват частоты системой, в результате чего в спектре мощности преобладает единственная частота (рис.6.) – частота внешнего сигнала. Данное явление является явлением синхронизации колебаний пучка, внешним сигналом. Одним из важных выводов, который можно сделать на основании проведенных расчетов 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.

## 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]. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [4]. Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1736.
- [5]. Мануилов В.Н., Электронные пучки для мазеров на циклотронном резонансе и лазеров на свободных электронах // Том 7. - СОЖ, 2001г.
- [6]. Егоров Е.Н., Храмов А.Е. К вопросу о возникновении виртуального катода в винтовом электронном потоке под действием пространственного заряда пучка// Письма в ЖТФ. **36**, 13 (2010) 38-46.
- [7]. Егоров Е.Н., Нелинейные колебательные явления в системах, содержащие нерелятивистские электронные пучки с виртуальным катодом в тормозящем поле //Диссертация, 2007
- [8]. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е., Формирование и нелинейная динамика сжатого состояния винтового электронного пучка с дополнительным торможением //Плазменная электроника ,том 39 №11, 2013г.