

## ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ В НИЗКОВОЛЬТНОМ ВИРКАТОРЕ ПОД ВНЕШНИМ ГАРМОНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ\*

*Н.С. Фролов*

В работе проведено теоретическое исследование динамики электронного потока в генераторе на виртуальном катоде под влиянием внешнего гармонического воздействия. Поведение электронного потока рассматривалось в рамках стационарной аналитической модели, а также численного моделирования нестационарных процессов в пучке. В обоих случаях показано, что увеличение мощности внешнего воздействия приводит к росту мощности выходного излучения генератора. Результаты теоретического исследования дают объяснение физических явлений, приводящих к увеличению выходной мощности системы, а также находятся в хорошем качественном соответствии с экспериментальными результатами, полученными ранее.

*Ключевые слова:* Виртуальный катод, электронный поток, виркатор.

### Введение

Генераторы на основе пучков с виртуальным катодом (ВК), или виркаторы, являются в настоящее время предметом активных теоретических и экспериментальных исследований в области вакуумной СВЧ-электроники [1, 2]. Источники СВЧ-излучения высокого уровня мощности на основе пучков с ВК вызывают интерес, поскольку обладают рядом характерных особенностей, таких как простота конструкции и возможность легкого управления режимами колебаний за счет подачи внешнего воздействия [3, 4] или создания различных типов обратной связи (схема виртода) [5–7].

Формирование ВК в таких системах происходит за счет превышения током пучка некоторого критического значения – предельного вакуумного тока.

Одной из активно исследуемых модификаций виркатора является низковольтная система (низковольтный виркатор) [8–11]. Для формирования ВК в низковольтном виркаторе применяется дополнительное торможение электронов в пространстве взаимодействия. Низковольтный виркатор в простейшем случае представляет собой

\*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6-11 февраля 2012.

пролетный промежуток с тормозящим полем, пронизываемый электронным пучком. Пролетный промежуток образован двумя сеточными электродами, а тормозящее поле определяется отрицательной разностью потенциалов между сетками промежутка.

Проведенные ранее экспериментальные работы [4, 12], посвященные влиянию внешнего сигнала на выходное излучение низковольтного виркатора, показали возможность увеличения выходной мощности генератора. В настоящей работе проводится теоретический анализ динамики электронного потока в описанной виркаторной системе, а также дается объяснение процессов, приводящих к росту мощности генерации виркатора при увеличении мощности внешнего одночастотного сигнала.

## 1. Теоретический анализ

В качестве исследуемой модели была выбрана одномерная модель низковольтного виркатора: электронный поток, инжектируемый электронной пушкой, попадает в пролетный промежуток с тормозящим полем, образованный двумя сетками (потенциал входной сетки  $V_0$ , а выходной  $V_0 - \Delta V$ ). Величина тормозящего поля определяется параметром  $\Delta V$  – разностью потенциалов между сетками. При увеличении торможения в пространстве взаимодействия формируется ВК, нестационарные колебания которого возбуждают отрезок спиральной электродинамической системы (ОСЭС), осуществляющей вывод мощности. Для ввода внешнего сигнала используется модулирующий ОСЭС, установленный между электронной пушкой и входной сеткой пролетного промежутка. Таким образом, на входе в пролетный промежуток электронный поток оказывается модулированным по скорости на частоте внешнего воздействия  $\omega_m$ . В работе рассматривается простейший случай, когда частота внешнего воздействия равна собственной частоте колебаний ВК  $\omega_m = \omega_{VC}$ . Значения управляющих параметров были выбраны соответствующими параметрам экспериментального макета низковольтного виркатора: ускоряющее напряжение  $U_0 = 3.0$  кВ, ток пучка  $I_0 = 250$  мА, расстояние между сетками пролетного промежутка  $l = 50$  мм, длина выходного ОСЭС  $l_{out} = 0.5l$ .

Как известно, ВК – колеблющийся потенциальный барьер, модулирующий электронный поток по скорости в пространстве взаимодействия и отражающий его обратно к области инжекции. Поэтому динамику электронного потока в рамках стационарной аналитической модели можно представить как задачу о движении заряженных частиц в тормозящем поле, образованном постоянной и переменной составляющими. Здесь постоянная составляющая соответствует тормозящему полю ВК и диодного промежутка, а переменная составляющая моделирует колебания поля ВК на частоте  $\omega_{VC}$ . При этом ВК в этой модели считается неподвижным.

В описанной модели уравнение движения электрона в пролетном промежутке

$$\ddot{x} = \frac{\eta}{L} (U_{VC} e^{j\omega_{VC} t} - U_d), \quad (1)$$

где  $\eta = e/m$  – удельный заряд электрона,  $L$  – расстояние между входной сеткой и сформированным ВК,  $U_{VC}$  – амплитуда колебаний потенциала поля ВК,  $U_d$  – постоянный потенциал тормозящего поля диодного промежутка и ВК. Для удобства анализа данной задачи проведем переход к безразмерным величинам:  $x = x'L$ ,  $t = t'L/v_0$ ,  $U = U'v_0^2/\eta$ , здесь  $v_0$  – невозмущенная скорость электронного потока на входе в пространство взаимодействия.

Интегрируя уравнение движения электрона в описанной модели (1) и учитывая, что поток является модулированным по скорости на входе в пролетный промежуток  $x = 0$ ,  $t(0) = t_1$ ,  $v(0, t_1) = v_0[1 + X \sin(\omega_m t_1)]$ , получим уравнения, определяющие координату и угол пролета движущейся частицы в пространстве взаимодействия

$$x = (1 + X \sin(\omega_m t_1))(t - t_1) - \frac{U_{VC}}{\omega_{VC}^2} [e^{j\omega_{VC}t} - e^{j\omega_{VC}t_1} - j\omega_{VC}e^{j\omega_{VC}t_1}(t - t_1)] - \frac{U_d}{2}(t - t_1)^2, \quad (2)$$

$$\phi(1 + X \sin(\omega_m t_1)) = \mu[e^{j\phi} - j\phi - 1]e^{j\omega_{VC}t_1} + \beta\phi^2. \quad (3)$$

Здесь  $\mu = U_{VC}/\omega_{VC}$  и  $\beta = U_d/2\omega_{VC}$ . Параметр  $\mu$  играет роль глубины модуляции электронного потока в пространстве взаимодействия полем ВК, а  $\beta$  определяет влияние тормозящего поля на динамику электрона в диодном промежутке;  $X$  – глубина модуляции электронного потока по скорости на входе системы на частоте внешнего воздействия. Выражение для сгруппированного тока в пролетном промежутке принимает вид

$$I = I_0 \left(1 + \frac{1}{\omega_{VC}} \frac{d\phi}{dt_1}\right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $I_0$  – невозмущенный ток пучка до попадания в пространство взаимодействия.

Для определения сгруппированного тока необходимо численно решить уравнение (3) и подставить полученный результат в (4). Учитывая, что вывод мощности реализован с помощью отрезка спиральной ЗС, выходную мощность можно описать как величину  $P = kIU_0$ , пропорциональную величине сгруппированного тока и ускоряющему напряжению, где  $U_0$  – ускоряющее напряжение,  $k$  – коэффициент связи пучка с отрезком электродинамической системы.

Анализ стационарной модели динамики электронного потока в низковольтном виркаторе показывает, что мощность выходного излучения генератора демонстрирует рост при увеличении мощности внешнего одночастотного сигнала (то есть с увеличением глубины скоростной модуляции пучка на входе в пролетный промежуток).

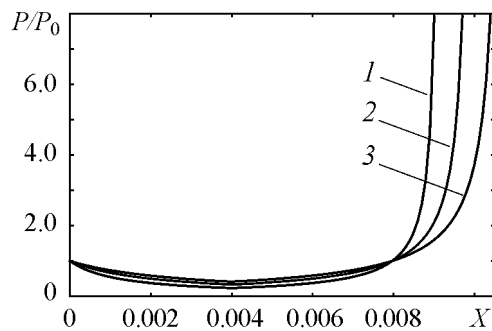


Рис. 1. Выходная мощность низковольтного виркатора в зависимости от глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пролетный промежуток для разных величин тормозящего поля, полученные теоретически для различных значений  $\beta$ : 1 – 0.00517, 2 – 0.00597, 3 – 0.00677 при  $\mu = 0.0039$

На рис. 1 изображены аналитические зависимости выходной мощности  $P/P_0$  (где  $P_0$  – выходная мощность в автономном режиме) от глубины предварительной модуляции электронного потока для разных величин тормозящего поля. Хорошо видно, что увеличение глубины модуляции  $X$ , которая пропорциональна амплитуде входного сигнала, влечет за собой возрастание мощности генерации за счет роста величины  $I$  – сгруппированного в области ВК тока. Теоретический анализ показывает, что увеличение мощности выходного сигнала в схеме низковольтного виркатора может проис-

ходить в 5...10 раз при экспериментально реализуемых амплитудах входного поля. Значительное увеличение мощности в рамках данной модели объясняется улучшением группировки потока в области ВК при скоростной модуляции потока внешним сигналом. При отсутствии внешнего воздействия группировка потока только в поле колеблющегося ВК сравнительно мала. Следует отметить, что при малой величине  $X$  наблюдается падение  $P/P_0$ , связанное с разгруппировкой потока. Далее с ростом  $X$  мощность начинает расти.

## 2. Численное моделирование

Результаты стационарной аналитической модели были проверены в рамках численного моделирования динамики одномерного электронного потока с ВК, формирующемся в тормозящем поле. Моделирование основано на методе крупных частиц. Электронный поток представляется как совокупность заряженных листов (крупных частиц), инжектируемых в пространство взаимодействия через равные промежутки времени. Здесь также удобно перейти к безразмерным величинам (подробнее см. [13]). Для каждого заряженного листа решаются нерелятивистские уравнения движения

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = -E(x_i). \quad (5)$$

Конфигурация поля пространственного заряда и распределение потенциала в межсеточном пространстве определяются с помощью покрытия пространства пролетного промежутка равномерной сеткой с шагом  $\Delta x$  и решения в ее узлах уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \alpha^2 \rho(x), \quad (6)$$

где  $\alpha$  – параметр Пирса, пропорциональный величине невозмущенного тока пучка. В рамках дальнейшего численного моделирования параметр  $\alpha = 0.9$  был выбран постоянным.

Распределение плотности пространственного заряда рассчитывается с помощью метода «частиц в ячейке», в ходе которого происходит линейное взвешивание заряженных листов в узлах пространственной сетки

$$\rho(x_j) = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^N \Theta(x_i - x_j), \quad \Theta(x) = \begin{cases} 1 - |x|/\Delta x, & |x| < \Delta x, \\ 0, & |x| > \Delta x. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь  $x_j$  – координата  $j$ -й крупной частицы;  $x_i$  – координата  $i$ -го узла пространственной решетки;  $N$  – полное число крупных частиц в пространстве взаимодействия;  $n_0$  – параметр численной схемы, равный числу частиц на ячейку в невозмущенном состоянии;  $\Theta(x)$  – кусочно-линейная функция, осуществляющая процедуру взвешивания частиц.

Моделирование входного и выходного ОСЭС проводилось с помощью метода эквивалентных схем, в рамках которого отрезки спирали математически представлялись системой дифференциальных телеграфных уравнений [14].

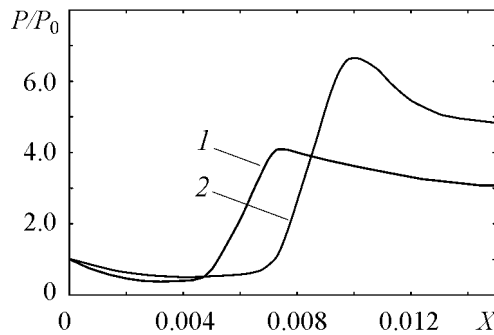


Рис. 2. Рассчитанные зависимости выходной мощности низковольтного виркатера в зависимости от глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пролетный промежуток для разных величин тормозящей разности потенциалов  $\Delta\varphi$ : 1 – 0.46, 2 – 0.47

При тормозящем поле, соответствующем разности потенциалов  $\Delta\varphi = 0.46$ , низковольтный виркатер без внешнего воздействия генерирует слабо хаотический сигнал (рис. 3, а), а при  $\Delta\varphi = 0.47$  колебания выходного излучения периодические с большим количеством частотных составляющих (рис. 3, б). Следует отметить, что характер зависимости мощности от глубины модуляции не зависит от режима выходных колебаний низковольтного виркатера в автономном режиме. Хорошо видно, что при малых амплитудах входного сигнала мощность выходного излучения ведет себя подобно зависимости выходной мощности, полученной в рамках простой аналитической теории. Однако, в отличие от результатов аналитической модели, численное моделирование показывает, что при определенной величине входной мощности (глубины модуляции потока) выходная мощность  $P$  достигает максимального значения и далее с ростом амплитуды внешнего поля начинает уменьшаться. Для различных тормозящих потенциалов выходная мощность демонстрирует максимальное значение при больших значениях мощности входного сигнала (при больших коэффициентах скоростной модуляции). Возникновение «падающего» участка на зависимости выходной мощности от мощности входного сигнала, как показало дополнительное исследование, обусловлено перераспределением плотности пространственного заряда в области виртуального катода.

Предварительная модуляция электронного потока внешним одночастотным сигналом при малой глубине модуляции приводит к разрушению структуры ВК и па-

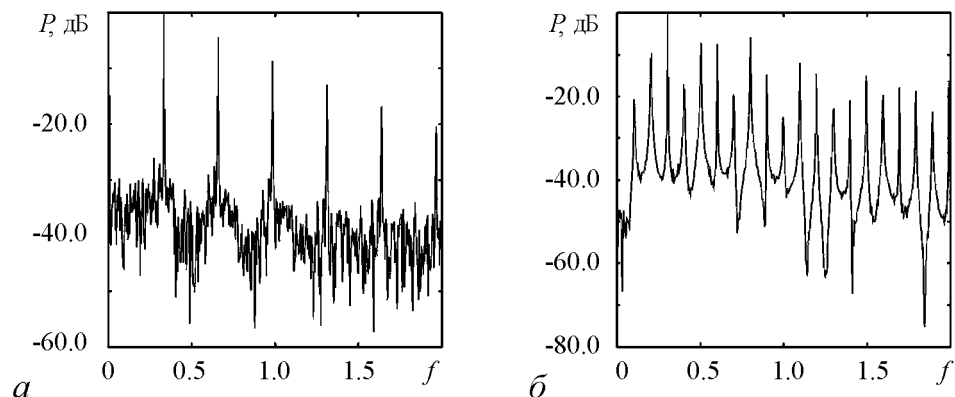


Рис. 3. Спектры выходного сигнала низковольтного виркатера в отсутствии внешнего воздействия для различных уровней тормозящего поля  $\Delta\varphi$ : а – 0.46, б – 0.47;  $f$  – безразмерная величина

дению плотности пространственного заряда (рис. 4, *a, z*). На зависимости  $\langle \rho(x) \rangle$  наблюдается несколько максимумов, что свидетельствует о разрушении плотного сгустка в области ВК и формировании нескольких структур. Последующее увеличение мощности внешнего воздействия улучшает эффективность группировки электронов в пространстве взаимодействия. Это способствует формированию более плотных электронных сгустков в области выходной спирали (рис. 4, *б, д*) и получению максимальной выходной мощности при наиболее эффективной группировке электронов. Дальнейшая скоростная модуляция пучка приводит к большему скоростному разбросу заряженных частиц на входе в пролетный промежуток. Поэтому большее количество электронов может преодолеть потенциальный барьер ВК, нарушая при этом его структуру и уменьшая плотность электронных сгустков (рис. 4, *в, е*). Таким образом выходная мощность колебаний ВК, зависящая от величины сгруппированного в пространстве взаимодействия тока, уменьшается с ростом мощности внешнего воздействия.

Простая аналитическая теория не может описать эффекты, связанные с перераспределением плотности пространственного заряда в области ВК за счет роста глубины предварительной модуляции, так как в рамках нее предполагается, что весь электронный поток отражается от ВК обратно к плоскости инжекции, и положение ВК в пространстве считается фиксированным. Поэтому в рамках аналитической теории возможно описать рост выходной мощности с увеличением амплитуды внешнего сигнала, но дальнейшее сложное поведение амплитудной характеристики виркатора с помощью данной теории описать невозможно и требуется численное моделирование.

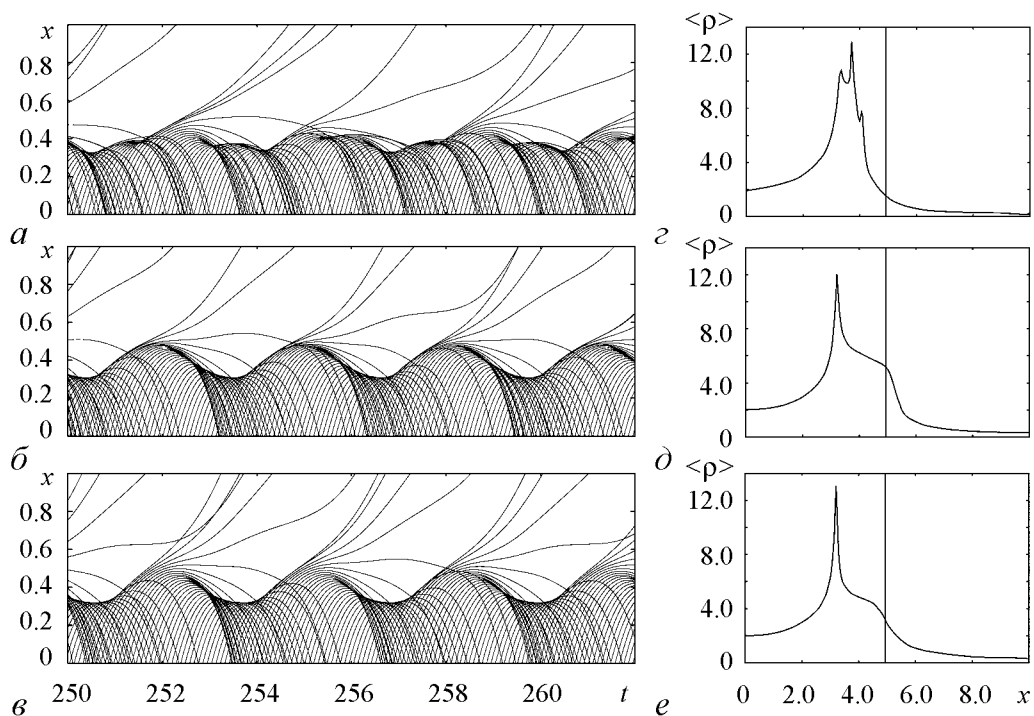


Рис. 4. Пространственно-временные диаграммы (*a, б, в*) и средние плотности распределения пространственного заряда (*z, д, е*), соответствующие характерным участкам зависимости выходной мощности от глубины предварительной модуляции  $X$  для величины тормозящего потенциала  $\Delta\varphi = 0.47$ : 1 – 0.06, 2 – 0.12, 3 – 0.3

## Заключение

Теоретическое исследование динамики нерелятивистского электронного потока с виртуальным катодом показывает возможность увеличения выходной мощности низковольтного виркатора под воздействием внешнего гармонического сигнала, а также объясняет рост мощности выходного излучения с позиций эффективной группировки электронного потока в пространстве взаимодействия за счет предварительной скоростной модуляции пучка. Полученные результаты находятся в хорошем качественном и количественном согласии с результатами, полученными в эксперименте под руководством Ю.А. Калинина [12]: при повышении мощностью внешнего воздействия в эксперименте наблюдался быстрый рост выходной мощности генератора, который превышал мощность автономной генерации примерно в 5 раз. Далее мощность генерации достигала максимального значения и уменьшалась с дальнейшим ростом мощности внешнего гармонического сигнала. Результаты численного моделирования и экспериментальных измерений на макете виркатора на разборной вакуумной установке свидетельствуют, что воздействие сигнала позволяет при определенных условиях увеличить выходную мощность низковольтного в 5...10 раз. Предполагается, что эффективной на практике схемой увеличения мощности может быть виркатор с обратной связью, когда модуляция инжектируемого потока осуществляется непосредственно СВЧ-сигналом, снимаемым с виркатора.

*Работа выполнена при поддержке Фонда некоммерческих программ «Династия» и РФФИ (проекты 12-02-00345 и 12-02-90022).*

## Библиографический список

1. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
2. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Вып. 47, № 6. С. 575.
3. Woo W., Benford J., Fittinghoff D., Harteneck B., Price D., Smith R., Sze H. Phase locking of high-power microwave oscillator // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65, № 2. P. 861.
4. Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. Влияние внешнего сигнала на колебания в электронном потоке с виртуальным катодом: Эксперимент и численное исследование // Изв. РАН. Сер. физич. 2005. Вып. 69, № 12. С. 1736.
5. Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью – виртод // Физика плазмы. 1993. Вып. 19, № 4. С. 530.
6. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. Численное исследование характеристик генерации виркатора-клистрона с внешней запаздывающей обратной связью // Радиотехника и электроника. 2001. Вып. 46, № 5. С. 588.
7. Hramov A.E., Rempen I.S. Investigation of the complex dynamics and regime control in Pierce diode with the delay feedback // Int. J. Electronics. 2004. Vol. 91, № 1. P. 1.
8. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // Физика плазмы. 2005. Вып. 31, № 11. С. 1009.
9. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверх-

высоких частот / Ред. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, А.А. Короновский. Т. 2. М.: Физматлит, 2008.

10. *Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P., Koronovskii A.A., Felsteiner J.* Influence of background gas ionization on oscillations in a virtual cathode with a retarding potential // *Physics of Plasmas*. 2009. Vol. 16, № 3. 033106.
11. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Исследование когерентных структур в электронном пучке со сверхкритическим током с помощью вейвлетной бикогерентности // *Физика плазмы*. 2002. Вып. 28, № 8. С. 722.
12. *Калинин Ю.А., Храмов А.Е.* Экспериментальное исследование влияние внешнего сигнала на СВЧ-колебания в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом // *Письма в ЖТФ*. 2006. Вып. 32, № 13. С. 88.
13. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Левин Ю.И., Храмов А.Е.* Исследование образования структур и хаотической динамики в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем электронном поле // *Радиотехника и электроника*. 2007. Вып. 52, № 1. С. 51.
14. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* Исследование мощности СВЧ генерации в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле // *Письма в ЖТФ*. 2006. Вып. 32, № 9. С. 71.

*Саратовский государственный  
университет им. Н.Г. Чернышевского*

*Поступила в редакцию 10.05.2012*

## **DYNAMICS OF ELECTRON FLOW WITH VIRTUAL CATHODE IN LOW-VOLTAGE VIRCATOR UNDER EXTERNAL FORCE**

*N.S. Phrolov*

Theoretical research of dynamics of electron flow with virtual cathode in low-voltage vircator under external harmonic force has been held in this work. The behavior of electron flow was considered within the framework of both stationary analytic model and numerical simulation of electron flow nonstationary processes. The increasing of low-voltage vircator output power while increasing external force has been shown in both cases. The results of theoretical research let us to explain physical phenomenon leading to output power increasing. Although obtained results are in a good qualitative agreement with experimental data.

*Keywords:* Virtual cathode, electron flow, vircator.



*Фролов Никита Сергеевич* – родился в 1992 году в Энгельсе, студент 5 курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Сфера научных интересов: вакуумная СВЧ-электроника и синхронизация распределенных систем. Участник научных конференций «Волновые явления в неоднородных средах» (2010, 2011, 2012), «Нелинейные дни для молодых» (2010, 2011, 2012), «ХАОС» (2010), «XV Международная зимняя школа по электронике СВЧ и радиофизике» (2012). Автор более 10 научных публикаций. Лауреат конкурса фонда некоммерческих программ «Династия» (2012).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: phrolovn@gmail.com