



УДК 537.533.7

## PECULIARITIES OF VIRTUAL CATHODE FORMATION IN TUBULAR ELECTRON BEAM IN CROSSED FIELDS OF COAXIAL CYLINDERS

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА В ТРУБЧАТОМ ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ

Alikov S.A. / Аликов С.А.

postgraduate / аспирант

Shein A. G. / Шейн А. Г.

d.p.-m.s., prof. / д.ф.-м.н., проф.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Lenin Ave. 28, 400131

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, пр. Ленина 28, 400131

**Аннотация.** В работе рассматривается явление формирования виртуального катода в трубчатом электронном потоке с продольным магнитным и поперечным электрическим полем коаксиальной структуры. Приведены результаты численного моделирования динамики электронных пучков в данных полях методами «частица-частица» с учетом эффектов запаздывания. Изучено влияние электрического поля коаксиальной системы на образование виртуального катода и срыв электронного облака. С увеличением по модулю электрического поля образование виртуального катода происходит раньше, а срыв электронного облака происходит позже. Знак разности потенциалов между коаксиальными цилиндрами на данные эффекты не влияет.

**Ключевые слова:** трубчатый релятивистский электронный поток, эффект запаздывания, потенциалы Лиенара-Вихерта, метод крупных частиц, скрещенные поля.

#### Вступление.

Одной из основных задач современной СВЧ-электроники является изучение образования виртуальных катодов в приборах различного типа. Явление виртуального катода обычно считается паразитным, хотя и нашло свое применение в генераторах известных как виркаторы.

Особый интерес с точки зрения теории и практики играет образование виртуального катода в трубчатых релятивистских электронных потоках [1, 2]. Обычно данную задачу рассматривают в системе из проводящего цилиндра. Данная работа направлена на изучение явления виртуального катода в системе коаксиальных цилиндров. Возможность подать на цилиндры разность потенциалов позволяет изучить влияние электрического поля системы на динамику электронного потока в скрещенных полях с учетом эффектов запаздывания электромагнитного поля [3, 4].

#### Геометрия системы и основные положения модели

Геометрия системы и основные обозначения представлены на рисунке 1. Здесь 1 – инжектор, 2 – катод системы радиуса  $R_1$ , 3 – анод системы радиуса  $R_2$ . Между катодом и анодом и приложено напряжение  $U$ , которое создает в системе неоднородное электрическое поле с единственной  $r$ -компонентой:

$$E_r = -\frac{U}{\ln(R_2 / R_1)} \frac{1}{r} = -\frac{A}{r}. \quad (1)$$



Магнитное поле направлено вдоль оси  $z$ .

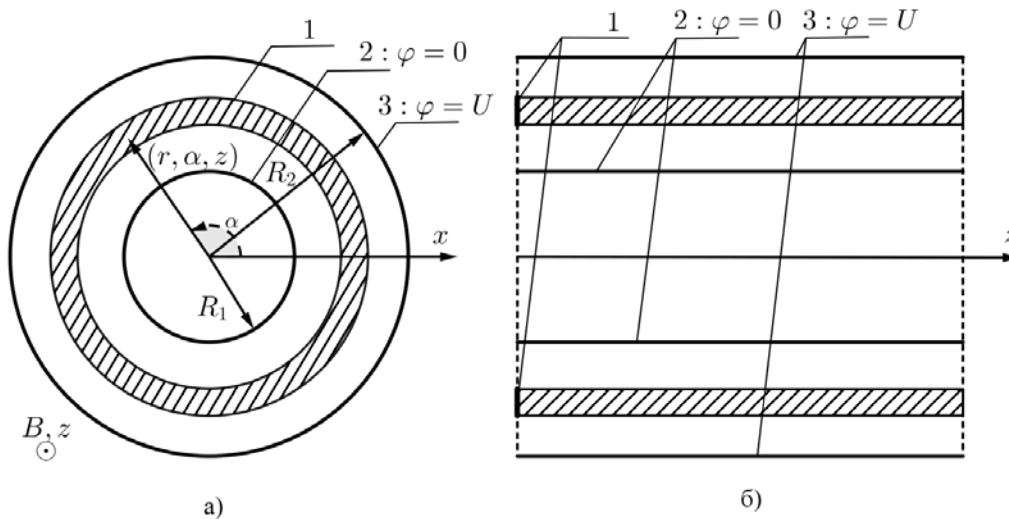
Изучение динамики электронного потока проводится с помощью метода крупных частиц, который позволяет снизить вычислительную сложность задачи. В данном методе группа частиц заменяется одной частицей с зарядом и массой, связанными с количеством частиц в группе – коэффициентом укрупнения  $k$ :

$$m = km_e, \quad q = -ke. \tag{2}$$

Здесь  $m_e$  – масса электрона, а  $e$  – модуль его заряда. Частицы инжектируются с кольцевой поверхности 1. Поток рассматривается как моноскоростной, обладающий единственной компонентой скорости  $V_z$ .

В программе численного моделирования коэффициент укрупнения рассчитывался из известной плотности пространственного заряда  $\rho$ , количества крупных частиц  $N$ , попадающих в пространство взаимодействия за время  $\Delta t$  (шаг по времени в численной схеме) и начальной скорости  $V_z$ . Для потока с площадью  $S$  в плоскости  $z = 0$ :

$$k = \frac{|\rho|SV_z\Delta t}{Ne}. \tag{3}$$



**Рис. 1. Геометрия системы: а) вид в плоскости  $(x, y)$ ; б) вид в плоскости  $(z, x)$ ; 1 – инжектор; 2 – катод; 3 – анод**

Уравнения движения  $i$ -й крупной частицы:

$$\frac{d\vec{p}_i}{dt} = q \left( \vec{E} + \sum_{i,j \neq i} \vec{E}_{ji} + \frac{\vec{p}_i c}{\sqrt{p_i^2 + m^2 c^2}} \times \left[ \vec{B} + \sum_{i,j \neq i} \vec{B}_{ji} \right] \right), \tag{4}$$

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{\vec{p}_i c}{\sqrt{p_i^2 + m^2 c^2}}.$$

Здесь  $\vec{E}$  – неоднородное поле (1), создаваемое в системе коаксиальных цилиндров разностью потенциалов  $U$ ,  $\vec{B}$  – однородное магнитное поле,



направленное вдоль  $z$ , суммы  $\sum_{i,j \neq i} \vec{E}_{ji}$ ,  $\sum_{i,j \neq i} \vec{B}_{ji}$  содержат вклад поля пространственного заряда. Каждое слагаемое суммы представляет собой электрическое и магнитное поле соответственно, создаваемое  $j$ -й крупной частицей в точке с  $i$ -й крупной частицей. Для учета эффектов запаздывания, которые играют существенную роль в релятивистских электронных пучках, данные слагаемые рассчитывались по соотношениям Лиенара-Вихерта в предположении, что частицы являются точечными. Аналогичные соотношения справедливы и для шарообразных частиц в собственной системе отсчёта вне пределов границы шара. Если ввести обозначения [5]:

$$\vec{R} = \vec{r}_i(t) - \vec{r}_j(\tau), \quad R = |\vec{R}|, \quad \vec{n} = \frac{\vec{R}}{R}, \quad (5)$$

то

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ji} = & -\frac{ke}{4\pi\epsilon_0 R^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{\vec{n} \cdot \vec{v}_j(\tau)}{c}\right)^3} \times \left[ \left(1 - \frac{v_j^2(\tau)}{c^2}\right) \left(\vec{n} - \frac{\vec{v}_j(\tau)}{c}\right) + \right. \\ & \left. + \frac{R}{c^2} \vec{n} \times \left( \left(\vec{n} - \frac{\vec{v}_j(\tau)}{c}\right) \times \vec{a}_j(\tau) \right) \right]; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\vec{B}_{ji} = \frac{\vec{n} \times \vec{E}_{ji}}{c}.$$

Момент времени в прошлом  $\tau$  определяется из соотношения:

$$\tau = t - \frac{R(\tau)}{c}. \quad (7)$$

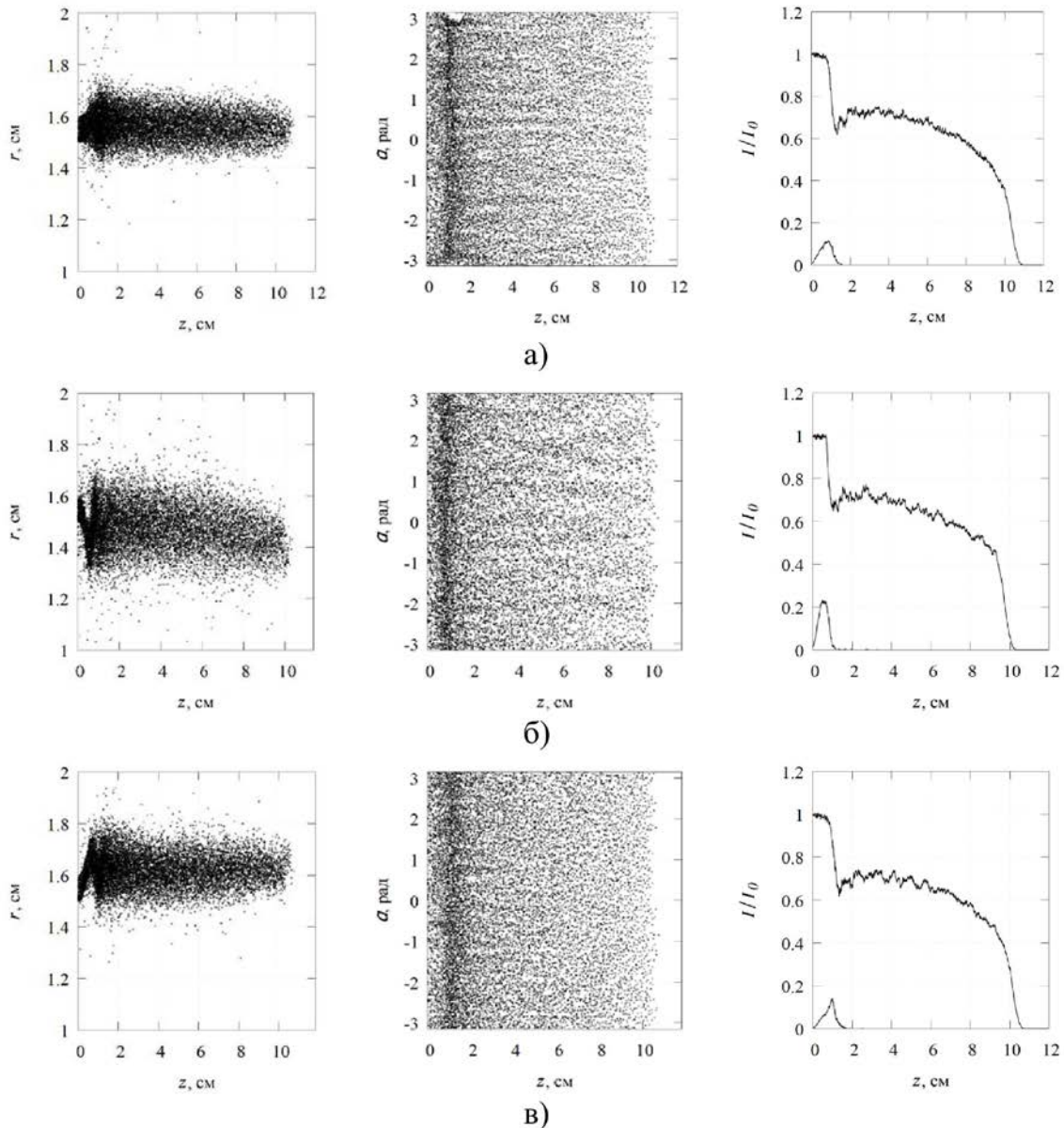
При численной реализации данное уравнение решается с помощью метода сфер. Для каждой пары частиц программа находит целое число  $l$  такое, что  $i$ -я частица оказывается между сферами радиусов  $lc\Delta t$  и  $(l+1)c\Delta t$  с центрами в точках  $\vec{r}_i(t-l\Delta t)$ ,  $\vec{r}_j(t-(l+1)\Delta t)$  соответственно. Решение уравнений движения проводится методами Рунге-Кутты 4-го порядка по импульсам и обобщённым на вторую производную методом Эйлера по координатам.

### Обсуждение результатов

В ходе работы проводилось численное моделирование динамики электронных потоков при различных величинах разности потенциалов  $U$ . На рисунке 2 приведены формы потоков в плоскостях  $rOz$  и  $\alpha Oz$  при скорости  $V_z = 0,8c$ . Параметры расчётов:  $\rho = -0,5$  Кл/м<sup>3</sup>,  $B = 1$  Тл, внутренний радиус кольцевой инжектирующей площадки 1,5 см, внешний радиус 1,6 см, радиус катода 1 см, радиус анода 2 см, шаг по времени  $\Delta t = 1$  пс, количество крупных частиц, инжектируемых в пространство взаимодействия за шаг  $N = 30$ . При магнитном поле  $B = 1$  Тл в отсутствие электрического поля и при данных параметрах расчета, как видно из рисунка 2а, образуется виртуальный катод –

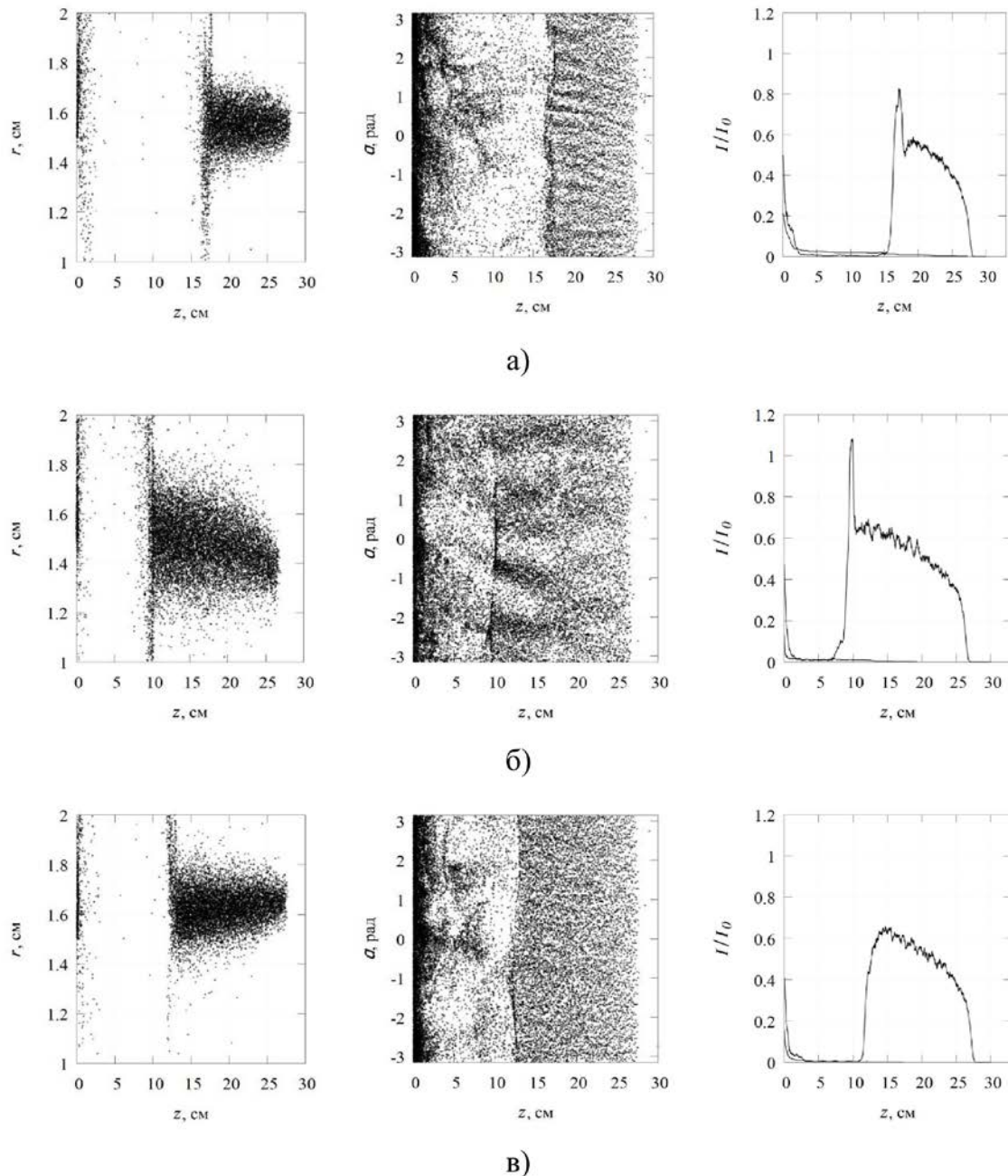


появляется обратный ток (нижняя линия на зависимости тока от координаты).



**Рис. 2. Формы потоков в момент времени  $t = 400$  пс и зависимость силы тока от координаты: а) без электрического поля; б)  $U = -1$  МВ; в)  $U = 500$  кВ**

Формирование виртуального катода начинается в каждом из трех случаев в различное время. Обратный ток для случая, когда электрическое поле отсутствует, появляется в промежутке времени от 220 до 240 пс, в случае  $U = -1$  МВ от 160 до 180 пс, в случае  $U = 500$  кВ от 200 до 220 пс. Как следует из рисунка 2, электрическое поле влияет на величину амплитуды обратного тока и при больших значениях электрического поля приводит к тому, что виртуальный катод формируется ближе к инжектору. Как и в работах [1, 2] поперечные колебания электронов в потоке играют существенную роль при образовании виртуального катода. Расчёты показывают, что появление дополнительного электрического поля в поперечном сечении приводит к тому, что виртуальный катод формируется раньше. Явление срыва виртуального катода приведено на рисунке 3.



**Рис. 3. Формы потоков в момент времени  $t = 1000$  пс и зависимость силы тока от координаты: а) без электрического поля; б)  $U = -1$  МВ; в)  $U = 500$  кВ**

Срыв виртуального катода и движение сгустка электронов к коллектору наоборот с появлением электрического поля происходит позднее. В отсутствие электрического поля срыв происходит в промежутке времени от 440 до 460 пс, при  $U = -1$  МВ от 680 до 700 пс, при  $U = 500$  кВ от 560 до 580 пс. При этом существенное число электронов покидает пространство взаимодействия, оседая на аноде системы. Формы потоков и зависимости силы тока от координаты представлены на рисунке 3 в момент времени  $t = 1000$  пс.

**Заключение и выводы.**

Увеличение электрического поля между цилиндрами до значений порядка скорости электронов, умноженных на величину продольного магнитного поля, приводит к тому, что сила, действующая на электроны со стороны



электрического поля, начинает по порядку совпадать с силой, действующей со стороны магнитного поля. Проявляются колебания электронов в поперечном сечении, которые в свою очередь способствуют появлению в системе обратного тока и формированию виртуального катода. Данный эффект не зависит от знака радиальной компоненты электрического поля. Чем больше поле, тем раньше появляется виртуальный катод и позднее происходит срыв облака электронов и его движение к коллектору. С другой стороны амплитуда колебаний электронов в поперечном сечении с ростом электрического поля возрастает, и поток начинает оседать на границы пространства взаимодействия.

#### Литература:

1. Храмов А.Е., Koronovskiy A.A., Kurkin S.A., Rempen I.S. Chaotic oscillations in electron beam with virtual cathode in external magnetic field // International Journal of Electronics. – 2011. – V. 98, № 11. – P. 1549-1564.
2. Куркин С.А., Храмов А.Е. Формирование виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 1. – С. 48-54.
3. Ковтун Д.Г., Кравченя П.Д., Шеин А.Г. Влияние металлических стенок пространства взаимодействия на форму релятивистских электронных потоков, движущихся в скрещенных полях // Изв. ВолгГТУ. – 2011. – Т. 5, № 6. – С. 30-36.
4. Shein A.G., Bakulin V.M., Mutovkin A.N. Computing the Space-Charge Fields of M-Type Tubes // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2000. – Vol.45, Is.10. – P. 1146-1149.
5. Федорченко А.М. Теоретическая физика. Классическая электродинамика : учеб. пособие. – Киев : Выща школа. Головное издательство, 1988. – 280 с.

#### **Abstract.**

##### **Introduction**

*Of particular interest from the point of view of theory and practice is the formation of a virtual cathode in tubular relativistic electron beams [1, 2]. Usually this problem in a system of a conducting cylinder is considered. This work at studying the virtual cathode phenomenon in a system of coaxial cylinders is aimed. The possibility of applying a difference of potentials to the cylinders makes it possible to study the influence of the electric field (1) of the system on the dynamics of the electron beam in crossed fields, taking into account the electromagnetic field delay effects [3, 4].*

##### **The geometry of the system and the basic concepts of the model**

*This section contains the main concepts of the model. Figure 1 shows the geometry of the system. Here 1 is the injector, 2 is the cathode of the system of radius  $R_1$ , 3 is the anode of the system of radius  $R_2$ . A voltage is applied between the cathode and the anode, which creates in the system an inhomogeneous electric field with a single component (Eq. 1). The magnetic field is directed along the  $z$ -axis. In the program for numerical simulation, a model of large particles is realized. The coefficient of enlargement  $k$  is determined by the expression (Eq. 3) and is related to the characteristics of the beam such as the density of space charge  $\rho$ , the number of large particles entering the interaction space in time step of the numerical scheme  $N$ , the initial velocity  $V_z$ , and the area of the injector  $S$  by expression (Eq. 3). Equations of a large particle motion by expression (Eq. 4) are given. Taking into account the delay effects, the field of the space charge is calculated*



by the sphere method and expressions (Eq. 5) - (Eq. 7).

### **The discussion of the results**

It is shown in this section that the presence of a transverse electric field leads to the formation of a virtual cathode begins earlier (Figure 2), and the phenomenon of electron beam interruption occurs later (Figure 3).

**Key words:** tubular relativistic electron beam, the delay effect, Lienard-Wiechert potentials, large particle method, crossed field.

### **References:**

1. Hramov A.E., Koronovskiy A.A., Kurkin S.A. and Rempen I.S. (2011). Chaotic oscillations in electron beam with virtual cathode in external magnetic field. *International Journal of Electronics*, 98(11), pp.1549-1564.
2. Kurkin S.A. and Hramov A.E. (2009). Formirovanie virtual'nogo katoda v trubchatom ehlektronnom potoke vo vneshnem magnitnom pole. *Technical Physics Letters*, 35(1), pp.48-54.
3. Kovtun D.G., Kravchenya P.D. and Shein A.G. (2011). Vliyanie metallicheskih stенок prostranstva vzaimodejstviya na formu relyativistskih ehlektronnyh potokov, dvizhushchihsya v skreshchennyh polyah. *Izv. VolgGTU*, 5(6), pp.30-36.
4. Shein A.G., Bakulin V.M., and Mutovkin A.N. (2000). Computing the Space-Charge Fields of M-Type Tubes. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 45(10), pp.1146-1149.
5. Fedorchenko A.M. (1988). *Teoreticheskaya fizika. Klassicheskaya ehlektrodinamika*. Kiev: Vyshcha shkola. Golovnoe izdatel'stvo, p.280.

Статья отправлена: 15.05.2018 г.

© Аликов С.А.