

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРКАТОРА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

П.И. Марков

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

E-mail: pmarkov@kipt.kharkov.ua

С помощью 2,5-мерного PIC-кода численно промоделированы процессы динамики релятивистского электронного пучка в виркаторе, представляющем собой два состыкованных цилиндра разных радиусов при наличии обратной связи по полю. Моделирование показало, что при выбранных параметрах модели виртуальный катод образуется в области ступенчатого изменения радиуса боковой поверхности виркатора. Обнаружено, что введение обратной связи по полю дает возможность изменять время образования виртуального катода, а также его положение в пространстве посредством изменения коэффициента обратной связи. С увеличением значения коэффициента обратной связи в спектре колебаний электрического поля возрастает амплитуда высокочастотных составляющих, что, в конечном итоге, может привести к развалу электронного пучка.

1. ВВЕДЕНИЕ

Генераторы мощного СВЧ-излучения на виртуальном катоде (виркаторы) [1, 2] привлекают внимание исследователей с конца 70-х годов. Они отличаются высоким уровнем мощности генерации СВЧ-излучения, простотой конструкции, легкостью перестройки частоты и режима генерации. Принцип работы виркаторов основан на формировании в электронном потоке, проходящем через резонатор, с током, превышающим предельный вакуумный ток [3], виртуального катода (ВК).

На режим генерации электромагнитных полей в виркаторе оказывают влияние геометрические параметры резонатора и электронного пучка, энергия электронов, а также величина внешнего продольного магнитного поля [4].

В связи с использованием виркаторов в качестве генераторов СВЧ-сигналов [5-9] возникает актуальная задача управления спектром генерации СВЧ-приборов с ВК. Один из методов ее решения связан с возможностью управления спектром генерации виркатора с помощью внешнего СВЧ-сигнала [10]. В данной работе управляющий СВЧ-сигнал предлагается брать вблизи области формирования ВК и воздействовать им на электронный поток непосредственно перед ВК, организуя, таким образом, обратную связь (ОС) в виркаторе.

Виртуальный катод является сильно нелинейным образованием, для полного описания которого используются численные методы. В настоящей работе исследование виркатора с ОС выполнено посредством численного моделирования с помощью 2,5-мерного PIC-кода [11].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЙ АЛГОРИТМ

В цилиндрически симметричный металлический резонатор, состоящий из двух состыкованных друг с другом областей меньшего радиуса R_1 длиной L_1 и большего радиуса R_2 длиной L_2 , через левый торец инжектируется релятивистский электронный пучок

(РЭП), имеющий кольцевое сечение. Толщина пучка $\Delta = r_2 - r_1$, где r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы пучка. Ток пучка – I_b . На входе в камеру дрейфа (при $z = 0$) пучок моноэнергетический, поперечные компоненты скоростей электронов равны нулю. В дрейфовом пространстве имеется внешнее магнитное поле с конечной величиной напряженности H_0 , направленной вдоль продольной оси z камеры дрейфа. Геометрия расчетной системы изображена на Рис.1.

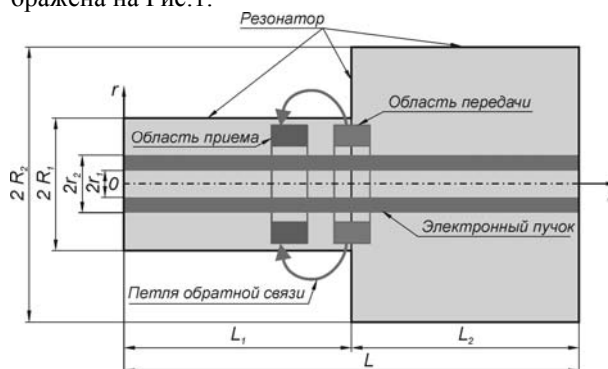


Рис.1. Геометрия расчетной системы

Поскольку исследуемая система является осесимметричной при численном моделировании динамики электромагнитных полей можно решать систему уравнений Максвелла в цилиндрических координатах для E - и H -волн:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_r}{\partial t} &= -c \frac{\partial H_\phi}{\partial z} - 4\pi j_r; & \frac{\partial H_r}{\partial t} &= c \frac{\partial E_\phi}{\partial z}; \\ \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{c}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) - 4\pi j_z; & \frac{\partial H_z}{\partial t} &= -\frac{c}{r} \frac{\partial}{\partial r} (c E_\phi); \\ \frac{\partial E_\phi}{\partial t} &= c \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) - 4\pi j_\phi; & \frac{\partial H_\phi}{\partial t} &= c \left(\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь E_r, E_z, E_ϕ та H_r, H_z, H_ϕ – компоненты напряженностей электрического и магнитного полей в цилиндрической системе координат, а j_r, j_z, j_ϕ – компоненты плотности тока макрочастиц, находящихся в камере дрейфа, которые вычисляются посредством механизма «раздачи» токов в узлы дву-

мерной пространственной сетки [12]. Положение и скорость каждой макрочастицы, необходимые для вычисления j_r , j_z и j_ϕ , определяются из решения уравнений движения:

$$\begin{cases} \ddot{r} = \beta \left[E_r - \dot{r} \delta + (r \dot{\phi} B_z - \dot{z} B_\phi) / c \right] + r \dot{\phi}^2; \\ \ddot{\phi} = \left\{ \beta \left[E_\phi - r \dot{\phi} \delta + (\dot{z} B_r - \dot{r} B_z) / c \right] - 2 \dot{r} \dot{\phi} \right\} / r; \\ \ddot{z} = \beta \left[E_z - \dot{z} \delta + (\dot{r} B_\phi - r \dot{\phi} B_r) / c \right], \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\beta = q \sqrt{1 - v^2 / c^2} / m, \quad v^2 = (\dot{r})^2 + (r \dot{\phi})^2 + (\dot{z})^2;$$

$$\delta = (\dot{r} E_r + r \dot{\phi} E_\phi + \dot{z} E_z) / c^2;$$

$$B_z = B_{z0} + H_z; \quad B_r = B_{r0} + H_r,$$

q и m – заряд и масса макрочастицы.

Численное решение уравнений (1) и «раздача» зарядов выполнялись на сдвинутых друг относительно друга пространственных и временных сетках. Для временной дискретизации уравнений движения (2) использовалась схема Бориса [13-15]. Значения скоростей макрочастиц вычислялись в полуцелые моменты времени $t^{n+1/2} = (n+1/2)\tau$, а координат (z_p, r_p) – в целые моменты времени $t^n = n\tau$ (n – целое, τ – шаг по времени). При этом значения компонент полей, входящие в уравнения движения (2), вычислялись путем линейной интерполяции из узлов сетки. В силу выбранной схемы решение уравнений Максвелла необходимо было выполнять в два раза чаще, чем уравнений движения. Поле H_ϕ вычислялось в моменты времени $t^{n\pm 1/4}$, а E_z и E_r – в моменты времени t^n и $t^{n+1/2}$.

Граничные условия для полей состояли в обращении в ноль тангенциальных компонент электромагнитного поля на стенках камеры дрейфа:

$$\begin{aligned} E_z|_{r=R_1} = 0; E_z|_{r=R_2} = 0; \\ E_r|_{z=0} = 0; E_r|_{z=L_1, R_1 \leq r \leq R_2} = 0; E_r|_{z=L} = 0; \\ E_\phi|_{r=R_1} = 0; E_\phi|_{r=R_2} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

а также в обнулении компонент E_z , E_ϕ и H_ϕ , H_r на оси резонатора:

$$E_r|_{r=0} = 0; E_\phi|_{r=0} = 0; H_\phi|_{r=0} = 0; H_r|_{r=0} = 0. \quad (4)$$

В начальный момент времени величины компонент электромагнитного поля в системе предполагались равными нулю. Частицы в резонаторе отсутствовали.

Для предотвращения возникновения электромагнитного шума с периодом, равным периоду сетки, на каждом десяти тысячном шаге счета выполнялось усреднение полей по девяти ближайшим точкам.

Основные параметры задачи были выбраны следующими: меньший и больший радиусы резонатора $R_1 = 2,5$ см, $R_2 = 4,5$ см, внутренний и внешний радиусы пучка $r_1 = 1,5$ см, $r_2 = 1,7$ см, энергия электронов пучка $eU_b = 280$ кэВ, напряжённость внеш-

него магнитного поля $H_0 = 8$ кЭ. Для моделирования длины узкой и широкой областей резонатора составляли $L_1 = 7,5$ см и $L_2 = 15$ см. Левая (входная) и правая (выходная) границы закрыты металлической (проводящей) сеткой, прозрачной для частиц. Для указанных поперечных размеров камеры дрейфа и электронного пучка, энергии электронного пучка предельный вакуумный электронный ток [3] составляет $I_{c1} = 3,82$ кА для узкой и $I_{c2} = 1,63$ кА для широкой областей. Поэтому для получения виртуального катода на границе широкой и узкой частей резонатора ток пучка был выбран $I_b = 2,5$ кА.

Для организации ОС в резонаторе были выбраны две кольцевые области одинакового поперечного сечения, схематически показанные на Рис.1. Область передачи располагалась на границе широкой и узкой частей резонатора, т.е. непосредственно возле виртуального катода. Область приема находилась перед областью передачи, ближе ко входной границе резонатора. Толщина и длина областей составляли 0,5 и 1,5 см соответственно. Внутренний радиус областей равнялся 1,8 см. Левая граница области передачи находилась при $z = 6,7$ см, а области приема – при $z = 4,6$ см.

ОС по электромагнитному полю состояла в том, что поля, рассчитанные по уравнениям Максвелла (1), в узлах, попадавших в область передачи, поступали в петлю ОС и через время запаздывания сигнала ОС $T_{\text{зан ОС}}$ умножались на коэффициент ОС $K_{\text{ОС}}$ и добавлялись к полям, находящимся в соответствующих узлах области приема. Передача поля в петлю ОС моделировалась умножением амплитуды поля на $(1 - K_{\text{ОС}})$. При расчетах время запаздывания сигнала ОС задавалось $T_{\text{зан ОС}} = 80$ пс, а коэффициент ОС $K_{\text{ОС}}$ варьировался в пределах от 0 до 0,2.

Осуществить описанную выше ОС можно с помощью магнитных или электрических зондов.

2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Параметры исследуемой модели были подобраны таким образом, что при распространении электронного пучка в области скачка радиуса боковой поверхности резонатора (т.е. вблизи $z = L_1$) в системе возникает ВК.

На Рис.2 показана фазовая плоскость в случае отсутствия ОС для момента времени 2,2 нс (тонкой линией на рисунке показана зависимость поля $E_z(z)$ на внешней границе пучка).

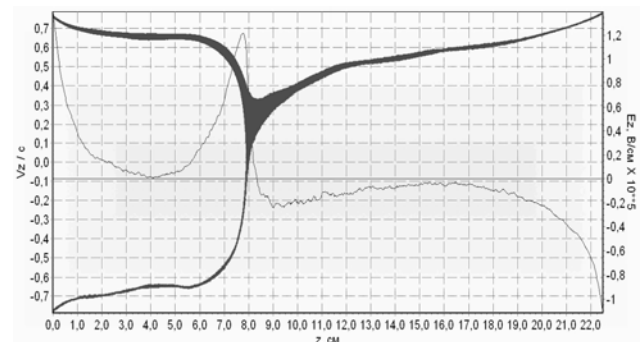


Рис.2. Фазовая плоскость при $K_{\text{ОС}} = 0$

При этом электронный пучок раскачивает в резонаторе колебания электромагнитного поля, динамика которых показана на Рис.3.

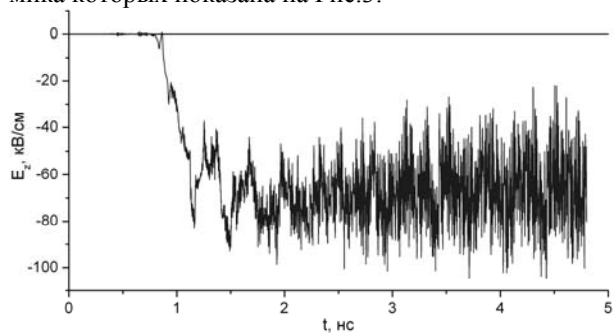


Рис.3. Зависимость напряженности электрического поля E_z на оси на правом торце резонатора от времени для $K_{OC} = 0$

В верхней части Рис.4 показан спектр колебаний поля $E_z(t)$.

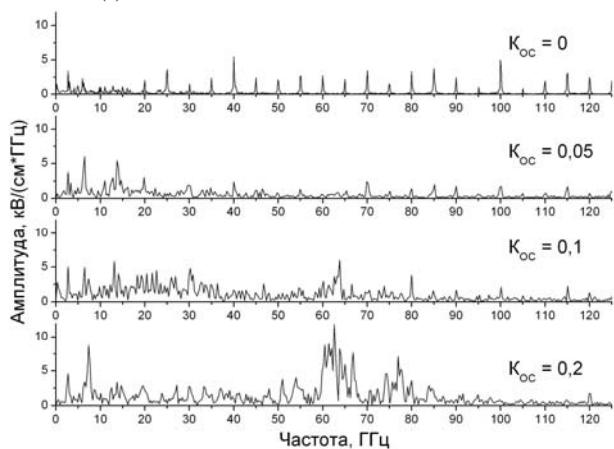


Рис.4. Спектр колебаний поля $E_z(t)$ для разных значений K_{OC}

Следует отметить, что хотя часть электронов пучка в ВК и останавливается, а затем движется обратно ко входному торцу резонатора, продольное магнитное поле в системе оказывается достаточным для того, чтобы поперечный разлет пучка был мал (Рис.5).

Введение в систему ОС при выбранной конфигурации областей передачи и приема эквивалентно увеличению пространственной области, благоприятной для образования ВК и сдвиганию ВК влево в направлении входного торца резонатора. Время формирования ВК уменьшается при этом. Так, при $K_{OC} = 0,2$ ВК на 1 см сдвигается в направлении входного торца резонатора, а время формирования ВК примерно в 4 раза меньше, чем в случае отсутствия ОС, и составляет всего 0,6 нс.

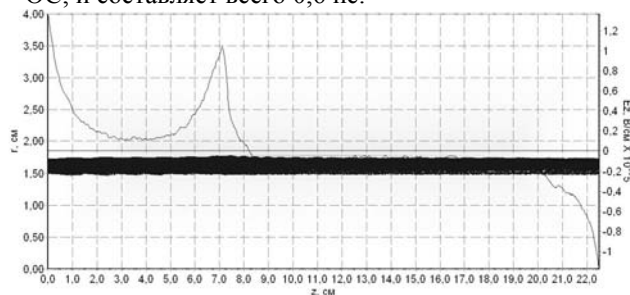


Рис.5. Конфигурационное пространство для $K_{OC} = 0$

Следует отметить, что в исследованной системе слева от области тормозящего электрического поля ВК возникает ускоряющее продольное поле. С увеличением коэффициента ОС ускоряющее поле становится сравнимым с замедляющим полем ВК. Это приводит к тому, что непосредственно перед ВК образуется виртуальный анод (ВА), разворачивающий электроны, движущиеся от ВК ко входному торцу резонатора и обратно в направлении к ВК. Отмеченные особенности проиллюстрированы на Рис.6.

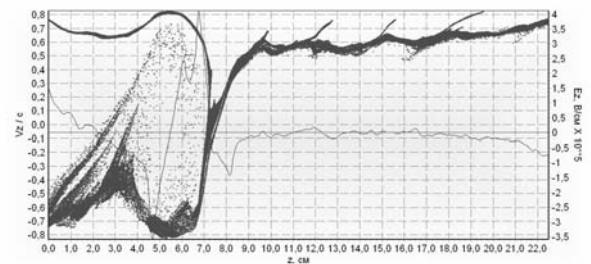


Рис.6. Фазовая плоскость при $K_{OC} = 0,2$

При движении электронов от ВК к ВА и обратно в системе возникают интенсивные высокочастотные колебания (Рис.7).

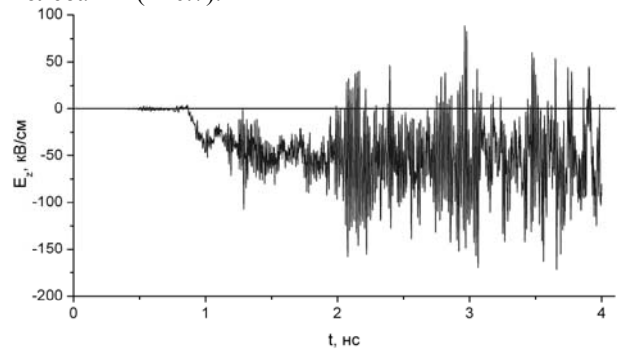


Рис.7. Зависимость напряженности электрического поля E_z на оси на правом торце резонатора от времени для $K_{OC} = 0,2$

Спектр колебаний поля $E_z(t)$ для этого случая приведен на нижнем графике Рис.4. Видно, что в спектре существенно увеличена амплитуда частот в области от 60 до 68 ГГц.

Поперечные поля, раскачиваемые в виркаторе с ОС, приводят к тому, что продольное магнитное поле уже не может скомпенсировать поперечный разлет электронов пучка, что видно на Рис.8.

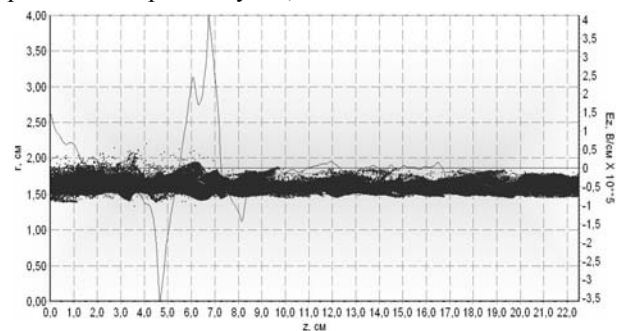


Рис.8. Конфигурационное пространство для $K_{OC} = 0,2$

В итоге это приводит к тому, что регулярное движение электронов в системе нарушается, и пучок начинает разваливаться.

ВЫВОДЫ

Выполненное численное моделирование динамики РЭП в виркаторе с ОС по полю показало, что при выбранных параметрах модели виртуальный катод образуется в области ступенчатого изменения радиуса виркатора. Замечено, что введение ОС дает возможность ускорять время образования виртуального катода, а также сдвигать его положение ко входному торцу посредством изменения коэффициента ОС K_{OC} . С увеличением значения K_{OC} в системе кроме ВК возникает ВА, это приводит к возрастанию амплитуды высокочастотных составляющих в спектре колебаний электромагнитного поля, что, в конечном итоге, может привести к развалу электронного пучка.

Выражаю благодарность Г.В. Сотникову за обсуждение постановки задачи и внимание к результатам исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. 646783 СССР, Н01 J 25/68. Генератор наносекундных импульсов / А.В. Пашенко, Б.Н. Руткевич // *Открытия. Изобретения*. 1979, №14.
2. V. L. Granatstein, I. Alexeff. High Power Microwave Sources // *Artech House Microwave Library*. 1987.
3. Л.С. Богданкевич, А.А. Рухадзе. Устойчивость релятивистских электронных пучков и проблема критических токов // *УФН*. 1971, т.103, №4, с.609-640.
4. С.А. Куркин, А.Е. Храмов. Формирование виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле // *Письма в ЖТФ*. 2009, т.35, в.1, с.48-54.
5. В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов. К вопросу о механизме возникновения хаотической динамики в вакуумном СВЧ-генераторе на виртуальном катоде // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1998, т.XLI, №9, с.1137.
6. S.A. Kitsanov, A.I. Klimov, S. D. Korovin, et al. A Vircator With Electron Beam Premodulation Based on High-Current Repetitively Pulsed Accelerator // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2002, v.30, №1, p.274-285.
7. Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов и др. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // *Физика плазмы*. 2005, т.31, №11, с.1009-1025.
8. П.И. Марков, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников. Виртуальный анод как источник низкочастотных колебаний сильнооточного электронного пучка // *Письма в ЖТФ*. 2003, т.29, в.23, с.1-7.
9. P.I. Markov, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov. To the question about mechanism of low-frequency modulation of a high-current relativistic electron beam // *УФЖ*. 2004, т.49, №1, с.619-626.
10. А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир. Управление спектром генерации виркатора с помощью внешнего СВЧ-сигнала // *Письма в ЖТФ*. 2000, т.26, в.13, с.17-22.
11. P.I. Markov, A.F. Korzh, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov. PIC simulation of nonlinear regime wake field excitation in cylindrical resonator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Methods Acceleration»*. 2006, №5(5), p.199-202.
12. Ю.А. Березин, В.А. Вшивков. *Метод частиц в динамике разреженной плазмы*. Новосибирск: «Наука», 1980, с.98.
13. J.P. Boris. *The acceleration calculation from scalar potential*: Preprint Plasma Physics Laboratory, Princeton University MATT-152, March 1970.
14. O. Buneman. Subring Resolution of Flow and Force Fields // *J. Comp. Phys.* 11, February 1973, p.250-268.
15. J.P. Boris. Relativistic plasma simulation-optimization of a hybrid code // *Proc. Fourth Conf. Num. Sim. Plasmas, Naval Res. Lab. Wash. D.C.*, 2-3 November 1970, p.3-67.

Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.

NUMERICAL SIMULATION OF VIRCATOR WITH THE FEEDBACK

P.I. Markov

By means of a 2,5-dimensional PIC-code the processes of dynamics of a relativistic electron beam in vircator, forming of two joined cylinders of different radiuses in the presence of a feedback across the field was modeled numerically. Modeling has shown that at model selected options the virtual cathode is formed at and around of step change of radius of a side surface of vircator. It is revealed that feedback introduction across the field gives the chance to change time of formation of the virtual cathode, and also its position in space by means of feedback factor changing. With increase in value of a feedback factor in a spectrum of oscillations of electric field the amplitude of high-frequency components increases that finally, can lead to breakdown of an electron bunch.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІРКАТОРА ЗІ ЗВОРОТНИМ ЗВ'ЯЗКОМ

П.І. Марков

За допомогою 2,5-вимірного PIC-коду чисельно промодельовані процеси динаміки релятивістського електронного пучка у віркаторі, що представляє собою два циліндри різних радіусів, що стикаються, при наявності зворотного зв'язку за полем. Моделювання показало, що при обраних параметрах моделі виртуальний катод утвориться в області східчастої зміни радіуса бокової поверхні віркатора. Виявлено, що введення зворотного зв'язку за полем дає можливість змінювати час утворення виртуального катода, а також його положення в просторі за допомогою зміни коефіцієнту зворотного зв'язку. Зі збільшенням значення коефіцієнту зворотного зв'язку в спектрі коливань електричного поля зростає амплітуда високо частотних складових, що, в остаточному підсумку, може призвести до розвалу електронного пучка.