

## ШИРОКОПОЛОСНАЯ ХАОТИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИК В СВЧ-ГЕНЕРАТОРЕ С ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И МАГНИТНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

*С.А. Куркин, А.А. Короновский, Ю.И. Левин, А.Е. Храмов*

В рамках двумерной численной модели исследована нелинейная динамика и генерация широкополосных хаотических сигналов в генераторе на электронном потоке с виртуальным катодом. Обнаружено сильное влияние характеристик внешнего неоднородного магнитного поля на нелинейную динамику виртуального катода в системе. Изучены физические процессы, ответственные за обнаруженную зависимость динамики электронного потока с виртуальным катодом от параметров внешнего неоднородного магнитного поля. Исследованы зависимости выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом от характеристик внешнего неоднородного магнитного поля. Проведена оптимизация параметров магнитной периодической фокусирующей системы генератора для достижения максимальной ширины полосы и мощности хаотической генерации.

*Ключевые слова:* СВЧ-генератор, интенсивный электронный поток, виртуальный катод, нелинейная динамика, СВЧ-электроника, виркатор, неоднородное магнитное поле, физическая и математическая оптимизация, численное моделирование, метод частиц

### Введение

Исследование нелинейных нестационарных процессов в распределённых активных средах, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, является одной из важных задач современной сверхвысокочастотной радиофизики и электроники больших мощностей [1–3]. Данные исследования имеют несомненное фундаментальное значение, связанное с выявлением общих закономерностей нелинейных нестационарных процессов в пучково-плазменных активных системах, с анализом физических процессов в распределённых автоколебательных средах, содержащих потоки заряженных частиц, взаимодействующие с электромагнитными полями электродинамических систем. Эти исследования невозможно проводить без привлечения современных методов анализа, развитых в нелинейной динамике. Весьма важным представляется и прикладное значение подобных

теоретических работ, так как они позволяют провести физическую и математическую оптимизацию характеристик существующих устройств и предложить новые модификации мощных приборов СВЧ-диапазона, которые будут иметь новые функциональные возможности.

Среди подобных новых устройств вакуумной электроники особое внимание уделяется генераторам широкополосных хаотических сигналов на основе электронных пучков с виртуальным катодом. Такие приборы, получив название генераторов хаоса с электронной обратной связью или низковольтных виркаторов [1, 4–7], представляют собой перспективные и важные устройства современной СВЧ-электроники для целей телекоммуникаций с использованием хаотических сигналов, шумовой радиолокации, модулей нелинейных антенн, могут быть использованы в технологических процессах и т.д. [8–12]. В настоящее время достигнуты определенные успехи в понимании принципов работы подобных устройств, проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования нового класса генераторов широкополосных хаотических сигналов [1, 6, 13–17].

В то же самое время, значительный интерес вызывает дальнейшее исследование различных режимов работы подобных систем и оптимизации процессов в них для получения необходимых характеристик одночастотного, узкополосного и широкополосного хаотического мощного выходного излучения. Одной из центральных здесь является задача улучшения выходных характеристик источников мощного СВЧ-излучения: выходной мощности, КПД, расширения полосы генерируемых частот (или наоборот, получения одночастотной генерации) и т.д. Практическая реализация этих задач представляет собой сложную научную и техническую проблему, решение которой возможно лишь на базе новейшей вычислительной техники с привлечением современных численных методов исследования и физической и математической оптимизации процессов, протекающих в электронных потоках, взаимодействующих с электромагнитными полями [18–20].

Одним из важных направлений работ может стать использование физической оптимизации приборов СВЧ, так как детальное знание физических процессов в подобных системах позволяет предложить различные модификации устройств, в которых удалось бы улучшить и оптимизировать выходные характеристики. Следует отметить, что применение только методов математической оптимизации к уравнениям модели устройства СВЧ-электроники может приводить к решениям, нереализуемым физически. Поэтому необходимо предварительное детальное изучение физических процессов в системе и нахождение физических способов улучшения процессов взаимодействия электронов и полей (например, изменения характера движения электронов за счет различной конфигурации фокусирующих полей, изменения свойств электродинамических систем и т.д.). После того, как тенденция к улучшению характеристик ясна, возможно дальнейшее применение методов математической оптимизации (например, вариационных методов и др.) [19, 20].

Одной из важных задач является разработка оптимальной фокусирующей магнитной системы для генератора на виртуальном катоде. Данная задача имеет несомненный прикладной интерес, однако существует и значительная фундаментальная ценность понимания влияния внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода в электронном потоке. Внешнее магнитное поле можно рассматривать как управляющий фактор, которым можно влиять на поведение

нелинейной активной среды, в частности, управляя процессами образования и взаимодействия электронных структур (электронных сгустков) во внешнем магнитном поле. Одной из первых работ, посвящённых изучению влияния внешнего магнитного поля на характеристики генерации виркатора, была работа [21], в которой были получены экспериментальные зависимости мощности и частоты СВЧ-излучения виркатора от величины внешнего магнитного поля. Позднее аналогичные экспериментальные исследования проводились в работах [22–24], которые также показали сильное влияние внешнего магнитного поля на характеристики СВЧ-излучения виртуального катода. Следует также отметить работу [25], в которой было проведено планомерное изучение влияния внешнего однородного магнитного поля на мощность генерации виртода и показано, что с изменением магнитного поля наблюдаются осцилляции величины выходной мощности в такой системе. Полученные экспериментальные данные были подтверждены результатами численного моделирования. В работе [26] с помощью численного моделирования с использованием релятивистского электромагнитного кода «KARAT» рассматривалась динамика виртуального катода в трубчатом электронном потоке при слабом магнитном поле. Было обнаружено, что в этом случае наблюдаются значительные пульсации проходящего пучка за плоскостью виртуального катода, которые оказывают сильное влияние на характеристики СВЧ-излучения в моделируемой системе. В работе [27] с использованием релятивистского электромагнитного кода «MAGIC» было проведено исследование влияния внешнего магнитного поля на КПД виркатора и обнаружено, что с увеличением магнитного поля КПД монотонно уменьшается, асимптотически стремясь к постоянной величине. Аналогичные результаты были получены в работе [28], где был выявлен физический механизм подобного поведения КПД в зависимости от величины магнитного поля. В работах [29, 30] проводилось исследование влияния внешнего магнитного поля на критический (предельный вакуумный) ток сплошного слабoreлятивистского электронного потока. Наконец, в работе [31] была показана существенная роль собственных магнитных полей пучка заряженных частиц на нелинейную динамику виртуального катода. Как показывает ряд предварительных исследований [32, 33], большую роль играет и неоднородность магнитных полей в области виртуального катода.

Из этого небольшого обзора становится очевидным, что динамика электронного потока со сверхкритическим током, а следовательно, и характеристики генерации приборов с виртуальным катодом, сильно зависят от величины внешнего магнитного поля. Однако систематического исследования данных вопросов не проводилось, поэтому процессы, происходящие в электронном потоке с виртуальным катодом при изменении фокусирующего пучок внешнего магнитного поля, до сих пор остаются плохо изученными и несистематизированными. Их понимание позволит продвигаться в изучении систем с виртуальным катодом, что является весьма важной и актуальной задачей электроники больших мощностей.

В представленной работе приведены результаты численного исследования влияния внешнего неоднородного магнитного поля на динамику виртуального катода и оптимизации параметров магнитной периодической фокусирующей системы низковольтного виркатора для достижения оптимальных характеристик выходного излучения. В работе также рассматриваются особенности нелинейной динамики электронного потока с виртуальным катодом при изменении внешнего магнитного поля,

изучаются различные механизмы хаотизации колебаний виртуального катода, приводящие к усложнению динамики виркаторной системы и к появлению многочастотного спектра излучения генератора с электронной обратной связью.

## 1. Исследуемая модель

Исследуемая модель генератора с электронной обратной связью (рис. 1, *a*) состоит из трех основных частей – источника электронов (электронной пушки); пространства дрейфа в виде отрезка цилиндрического волновода длиной  $L$  и радиусом  $R$ ; коллектора электронов отработанного пучка, а также электродинамического элемента, предназначенного для вывода СВЧ-мощности (генерируемого сигнала) из пространства взаимодействия.

В качестве источника электронного потока выступает электронная пушка с изолированным от магнитного поля термокатодом, формирующая аксиально-симметричный электронный поток на входе в пространство взаимодействия [34]. Электронный пучок с прямолинейными траекториями электронов, инжектируемый в пространство взаимодействия, предполагается моноскоростным. Сформированный сплошной электронный пучок с током  $I$  инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку и выводится через правую (выходную) сетку на коллектор, электроны также могут оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Обозначим внешний радиус пучка как  $R_b$ , и введём геометрический параметр электронного пучка  $\sigma = R_b/R$ .

Для вывода мощности в исследуемой модели используется отрезок широкополосной электродинамической системы (обычно отрезок спирали, обладающей широкой полосой частот и большим сопротивлением связи). Заметим, что в исследуемой модели пренебрегается джоулевыми потерями в стенках прибора и возможным излучением СВЧ-энергии в открытое пространство.

Вдоль оси пространства дрейфа, в котором формируется виртуальный катод, прикладывается внешнее фокусирующее неоднородное в пространстве магнитное поле, создаваемое магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) с  $N$  магнитными кольцами. Распределение магнитного поля в работе вычислялось с помощью свободно распространяемого пакета прикладных программ Ansoft Maxwell SV\*. На оси системы распределение в простран-

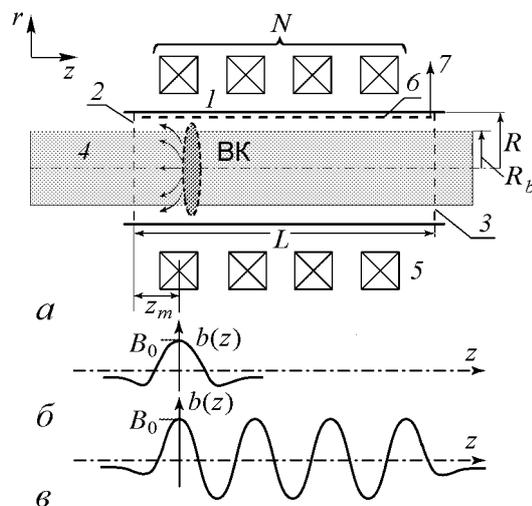


Рис. 1. *a* – схема исследуемого генератора с электронной обратной связью, использующего в качестве активной среды электронный поток с виртуальным катодом: 1 – цилиндрическое пространство дрейфа; 2 и 3 – входные и выходные сетки; 4 – электронная пушка; 5 – МПФС; 6 – широкополосная спиральная электродинамическая система (используемая для вывода выходного сигнала) с выводом энергии 7. *б* – характерное распределение магнитного поля на оси системы для одного магнитного кольца. *в* – распределение магнитного поля на оси системы для МПФС с четырьмя периодами

\*<http://www.ansoft.com/maxwellsv/>

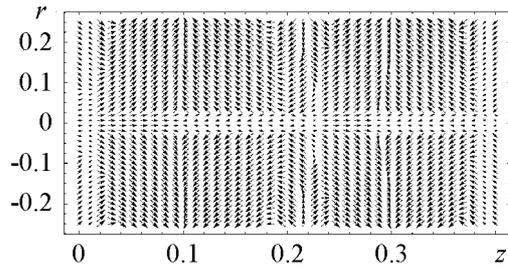


Рис. 2. Силовые линии магнитного поля в пространстве взаимодействия для МПФС с четырьмя магнитными кольцами. Магнитные кольца расположены в точках с безразмерными координатами  $z = 0.1$ ,  $z = 0.2$ ,  $z = 0.3$  и  $z = 0.4$ , соответственно

внешнего магнитного поля в области дрейфа пучка на рис. 2 показан характерный вид силовых линий магнитного поля для случая магнитной системы, состоящей из четырех магнитных колец. Расположение МПФС в пространстве характеризуется координатой первого магнита фокусирующей системы  $z_m$ . В представленном исследовании число магнитных колец МПФС менялось в диапазоне  $0 \leq N \leq 4$ , который соответствует экспериментальным макетам низковольтного виркатора [1, 6].

Для описания процессов в генераторе с электронной обратной связью будем рассматривать нестационарную двумерную модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия, которая основана на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц для моделирования динамики электронного пучка и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда [35, 36].

Следует заметить, что нахождение самосогласованного поля пространственного заряда с помощью уравнения Пуассона не позволяет корректно исследовать релятивистские пучки, то есть пучки с релятивистскими скоростями  $\beta_0 = v_0/c \geq 0.5$ , так как при этом не учитывается собственное магнитное поле электронного потока и связанные с ним эффекты пинчевания пучка. Поэтому в рамках используемой в работе математической модели исследуются только слаборелятивистские электронные потоки.

В уравнениях, описывающих динамику электронного пучка, используются следующие безразмерные величины потенциала  $\varphi$ , напряжённости  $E$  поля пространственного заряда, индукции  $B$  внешнего магнитного поля, плотности  $\rho$ , скорости  $v$  и импульса  $P$  электронов, а также пространственных координат  $z$  и  $r$ , времени  $t$ :

$$\begin{aligned} \varphi' &= \frac{v_0^2}{\eta_0} \varphi, & E' &= \frac{v_0^2}{L\eta_0} E, & B' &= \frac{v_0}{L\eta_0} B, & \rho' &= \rho_0 \rho, \\ v' &= v_0 v, & P' &= m_e v_0 P, & z' &= Lz, & r' &= Lr, & t' &= \frac{L}{v_0} t, \end{aligned} \quad (1)$$

где штрихом обозначены соответствующие размерные величины,  $\eta_0 = e/m_e$  – удельный заряд покоящегося электрона,  $v_0$  и  $\rho_0$  – не зависящие от радиуса статические (невозмущённые) скорость и плотность электронного потока на входе в систему,  $L$  – длина пространства взаимодействия.

стве дрейфа продольной компоненты магнитного поля можно записать в следующем виде:  $B_z(z, 0) = B_0 b(z)$  (рис. 1, б и в), где  $B_0$  – параметр МПФС, определяемый как максимальная величина магнитного поля на оси симметрии системы. При этом внешнее магнитное поле характеризуется как продольной, так и поперечной составляющими, в то время как азимутальная составляющая в силу аксиальной симметрии системы равна нулю. Для иллюстрации характера распределения

Численное моделирование нестационарных процессов в электронном пучке при инжекции его в пространство дрейфа проводилось методом крупных частиц. Он заключается в том, что электронный поток представляется в виде совокупности крупных частиц, которые в цилиндрической системе координат имеют вид заряженных колец. Для каждой заряженной частицы решались уравнения движения, записанные через компоненты её импульса. В цилиндрических координатах в безразмерных величинах (1) уравнения движения заряженных частиц записываются в следующем виде:

$$\frac{dP_{ri}}{dt} - \gamma(z_i, \theta_i, r_i) r_i \left( \frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 = -E_r - r_i B_z \frac{d\theta_i}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{\theta i}}{dt} + \gamma(z_i, \theta_i, r_i) \frac{dr_i}{dt} \frac{d\theta_i}{dt} = B_z \frac{dr_i}{dt} - B_r \frac{dz_i}{dt}, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{zi}}{dt} = -E_z + r_i B_r \frac{d\theta_i}{dt}, \quad i = 1, \dots, N_0, \quad (4)$$

где

$$\gamma(z_i, \theta_i, r_i) = \left( 1 - \beta_0^2 \left[ \left( \frac{dr_i}{dt} \right)^2 + \left( r_i \frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz_i}{dt} \right)^2 \right] \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

Здесь  $z_i$ ,  $r_i$  и  $\theta_i$  – продольная, радиальная и азимутальная координаты заряженных частиц соответственно;  $P_{zi} = \gamma \dot{z}_i$ ,  $P_{ri} = \gamma \dot{r}_i$  и  $P_{\theta i} = \gamma r_i \dot{\theta}_i$  – продольная, радиальная и азимутальная компоненты импульсов заряженных частиц соответственно;  $E_z$  и  $E_r$  – продольная и радиальная компоненты электрического поля;  $B_z(z, r)$  и  $B_r(z, r)$  – продольная и радиальная компоненты индукции магнитного поля (предполагается, что азимутальная составляющая внешнего магнитного поля равна нулю:  $B_\theta = 0$ );  $\beta_0 = v_0/c$ , где  $v_0$  – статическая (невозмущённая) скорость электронного потока на входе в систему,  $c$  – скорость света; индексом  $i$  обозначены номера частиц;  $N_0$  – полное число заряженных частиц, моделирующих электронный поток.

Уравнения движения (2)–(4) для каждой крупной частицы интегрировались численно методом с перешагиванием. Уравнение (3) может привести к неустойчивости азимутальной скорости частицы  $\dot{\theta}_i$ , так как из него следует, что  $\dot{\theta}_i \sim 1/r_i$ , и при малых  $r_i$  и больших временных шагах численного интегрирования  $\Delta t$  частица ведёт себя «нефизично», очень быстро приобретая вращательный момент. Для корректного решения уравнений движения для частиц, близко подошедших к оси симметрии, интегрирование уравнений производилось с повышенной точностью. Шаг интегрирования уменьшался до значения, когда численная схема становится устойчивой, при этом результаты интегрирования уравнений движения частиц начинают сходиться с уменьшением шага численного интегрирования  $\Delta t$ .

Распределение потенциала в пространстве взаимодействия находится самосогласованным образом с помощью уравнения Пуассона, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \alpha^2 \rho, \quad (6)$$

где

$$\alpha = L \left( \frac{|\rho_0|}{V_0 \varepsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

$V_0$  – ускоряющее напряжение пучка. Здесь  $\alpha$  – это безразмерный управляющий параметр (критерий подобия задачи [37]), пропорциональный току пучка, как  $\alpha \sim \sqrt{I}$ , и длине пространства взаимодействия, как  $\alpha \sim L$ . Уравнение Пуассона решается при следующих граничных условиях:

$$\varphi(z = 0, r) = 0, \quad \varphi(z = 1, r) = 0, \quad \varphi(z, r = R) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad (9)$$

где условие (8) задаётся тем, что пучок инжектируется в пространство, ограниченное идеально проводящей поверхностью под нулевым потенциалом; условие (9) на оси симметрии  $r = 0$  определяется аксиальной симметрией пространства взаимодействия. Уравнение Пуассона (6) решалось методом сеток. Для нахождения плотности пространственного заряда использовалась снижающая сеточный шум процедура билинейного взвешивания крупных частиц (PIC-метод) [36].

Отметим, что применение уравнения Пуассона справедливо, учитывая нерелятивистские энергии потока, когда можно пренебречь собственным магнитным полем электронного пучка и связанными с ним эффектами пинчевания потока [31]. Действительно, для характерных параметров исследуемого слабoreлятивистского потока ларморовская сила, определяемая собственным магнитным полем пучка,  $F_{r1} = \mu_0 e r v_0^2 / 2\pi R_b^2 \sim 10^{-4}$  Н оказывается значительно меньше фокусирующей (дефокусирующей) силы  $F_{r2} = r B_0 \dot{\theta}_i \sim 10^4$  Н, определяемой внешним магнитным полем, скоростью и направлением орбитального движения частиц. Из вышесказанного следует, что для рассматриваемого случая нерелятивистских и слабoreлятивистских электронных потоков использование уравнения Пуассона для вычисления самосогласованного поля является справедливым и обоснованным.

Численное моделирование вывода мощности в виде отрезка спиральной замедляющей системы проводилось с помощью метода эквивалентных схем (см. подробнее [13, 38, 39]).

## **2. Динамика выходного излучения и физические процессы в генераторе с неоднородным магнитным полем в области формирования виртуального катода**

На первом этапе исследований были рассмотрены характерные режимы колебаний в генераторе с электронной обратной связью при различных конфигурациях внешнего магнитного поля и различных токах электронного потока (рис. 3). Геометрические параметры пространства взаимодействия виркатора предполагались неизменными. Отметим также, что связь безразмерного параметра внешнего магнитного поля  $B_0$  с соответствующей размерной величиной  $B'$  определяется соотношением (1). Для типичных параметров макета низковольтного виркатора [5, 6, 16], рассматриваемых в данной статье (ускоряющее напряжение  $V_0 = 4$  кВ, длина пространства дрейфа  $L = 5$  см), безразмерной величине параметра магнитного поля  $B_0 = 1$  соответствует внешнее магнитное поле  $B' = 42$  Гс.

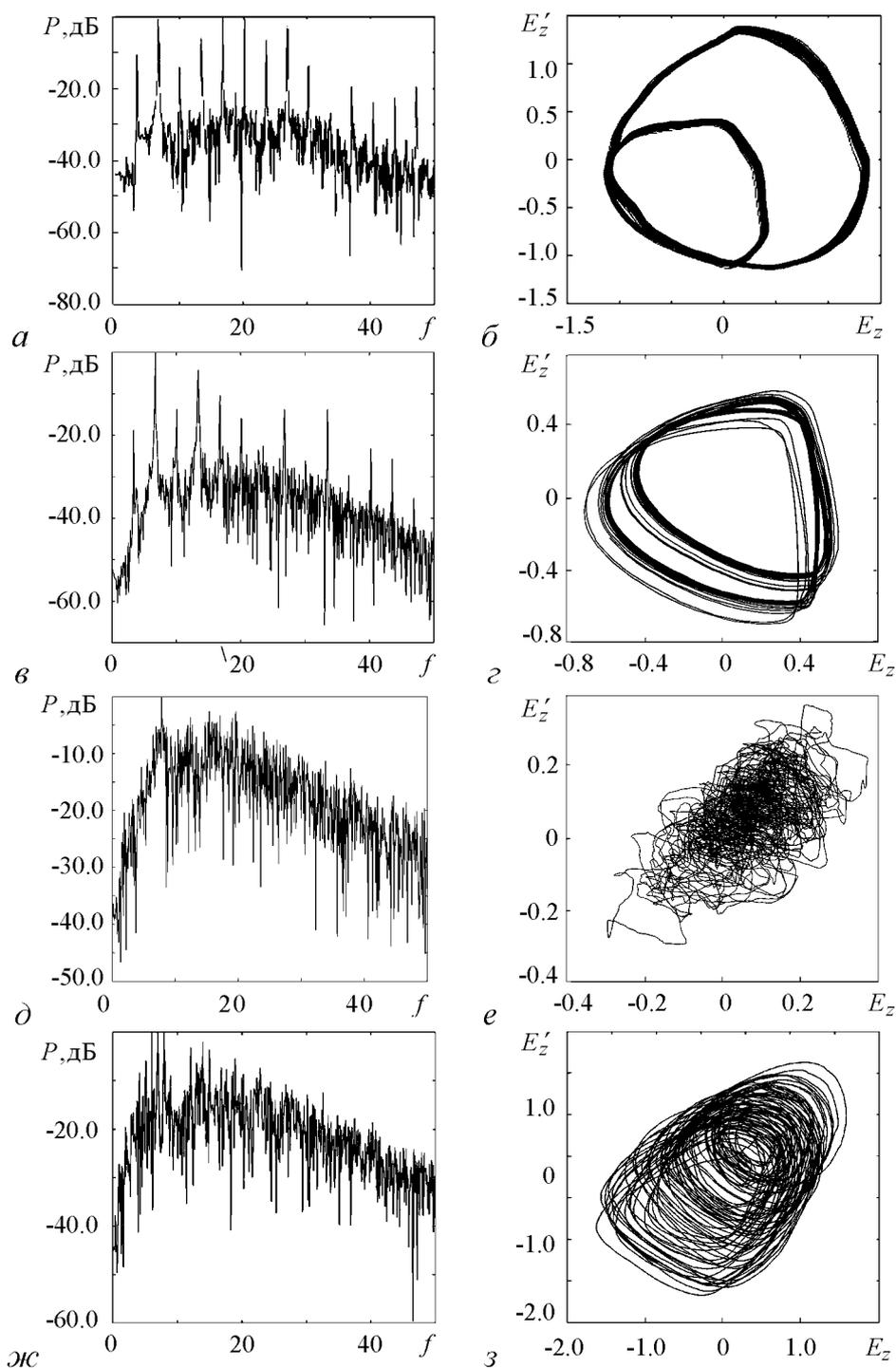


Рис. 3. Спектр мощности выходного поля ( $a$ ,  $в$ ,  $д$ ,  $жс$ ), регистрируемого отрезком спиральной электродинамической системы, и соответствующие проекции фазового портрета колебаний продольного электрического поля ( $б$ ,  $з$ ,  $е$ ,  $з$ ) в области виртуального катода для различных режимов колебаний, уровней фокусирующего магнитного поля и различного числа  $N$  кольцевых магнитов (управляющий параметр  $\alpha = 20$ ):  $a$ ,  $б$  – режим регулярной генерации, малое фокусирующее поле  $B_0 = 6$ ,  $N = 1$ ;  $в$ ,  $з$  – режим широкополосных хаотических колебаний при увеличении фокусирующего магнитного поля  $B_0 = 20$ ,  $N = 1$ ;  $д$ ,  $е$  – режим широкополосных хаотических колебаний, большое фокусирующее магнитное поле  $B_0 = 80$ ,  $N = 1$ ;  $жс$ ,  $з$  – режим широкополосных хаотических колебаний при увеличении числа кольцевых магнитов и среднем уровне фокусирующего поля  $B_0 = 20$ ,  $N = 4$

Исследование показало, что при отсутствии внешнего магнитного поля или при его малых величинах ( $B_0$  много меньших оптимального значения  $B_{\min}$ , при котором критический ток электронного потока минимален (см. подробнее [29])) в системе наблюдаются близкие к одночастотным режимы генерации. Спектр колебаний ВЧ поля на выходе системы богат высшими гармониками, однако уровень шумового пьедестала достаточно низок, что позволяет рассматривать данные режимы колебаний виртуального катода как режим регулярной генерации. Фазовый портрет колебаний продольного электрического поля в области виртуального катода также свидетельствует в данном случае о периодических колебаниях в системе. Соответствующие режиму характерный спектр мощности выходного поля и построенная методом Такенса проекция фазового портрета колебаний продольного электрического поля в области виртуального катода показаны на рис. *а, б*. Рисунок построен для системы с одним кольцевым магнитом ( $N = 1$ ).

С ростом величины параметра  $B_0$  внешнего магнитного поля в системе с одним кольцевым магнитом наблюдается усложнение колебаний, проявляющееся в росте шумового пьедестала, который поглощает наблюдающиеся гармоники колебаний виртуального катода (*в, з*). При большом параметре магнитного поля в выходном сигнале практически не наблюдается регулярной составляющей и спектр выходного сигнала близок к шумовому, а ширина полосы порядка одной октавы (*д*); фазовый портрет колебаний поля не имеет структуры и свидетельствует также о сложной хаотической динамике системы (*е*).

Аналогичное поведение демонстрирует генератор с электронной обратной связью при увеличении числа  $N$  магнитных колец в МПФС, с фиксированным значением параметра магнитного поля на оси системы  $B_0$ . Это демонстрируют рис. *ж, з*, построенный при тех же параметрах, что и рис. *в, з*, но с числом намагниченных колец в МПФС  $N = 4$ . Сравнивая рис. *в* и *з*, *ж* и *з*, соответственно, можно видеть, что увеличение числа магнитов в МПФС приводит к существенному усложнению динамики выходного излучения в системе с виртуальным катодом, шумовой пьедестал растет, гармонические составляющие колебаний виртуального катода уширяются и исчезают. В итоге, при  $N = 4$  спектр колебаний становится шумоподобным с шириной полосы частот порядка одной октавы. Вид спектра при большом числе периодов МПФС подобен спектру излучения при большой величине параметра магнитного поля  $B_0$  (ср. с рис. *д, е*, построенным при  $B_0 = 80$ ).

С чем связана такая динамика системы при изменении параметров магнитного поля? В первую очередь, такое поведение определяется динамикой пространственного заряда электронного потока в области виртуального катода, которая происходит в сильно неоднородном магнитном поле. Известно [40–46], что усложнение и хаотизация выходного излучения виркаторных систем определяется формированием электронных структур, которые, взаимодействуя между собой, приводят к усложнению поведения системы. Введение неоднородного магнитного поля в систему с виртуальным катодом позволяет более эффективно управлять этими процессами по сравнению со случаями системы без магнитного поля [47] или с однородным магнитным полем [48–50] и, как следствие, получить генерацию широкополосного хаотического сигнала с большей мощностью и большей шириной полосы генерируемых частот.

Наиболее просто рассмотреть физические процессы, сопровождающие перестройку динамики электронного потока с виртуальным катодом в генераторе с одним кольцевым магнитом. На рис. 4 показаны мгновенные конфигурационные портреты электронного потока в координатах  $(r, z)$  в последовательные моменты времени  $t_i$ , построенные для различных значений параметров магнитного поля. Анализ конфигурационных портретов применительно к системам с виртуальным катодом оказывается весьма полезным и продуктивным методом для визуализации и анализа процессов динамики пространственного заряда пучка в подобных системах. Каждая точка на конфигурационном портрете соответствует одной заряженной крупной частице, которые моделируют динамику потока (см. раздел 1).

Рис. 4, *a* соответствует малому магнитному полю. Максимум плотности пространственного заряда (области электронного уплотнения – электронной структуры) соответствует области виртуального катода, где заряженные частицы, тормозясь в его поле, останавливаются и отражаются обратно к плоскости инжекции или на стенки пространства дрейфа. Из рисунка хорошо видно, что динамика отраженных частиц протекает, в основном, в поперечном (радиальном) направлении в пространстве дрейфа. Такое поведение связано, в первую очередь, с силами пространственного заряда, которые не ограничиваются малым фокусирующим магнитным полем и приводят к существенному расширению пучка в поперечном направлении. Как следствие, при малом параметре внешнего магнитного поля формируется единственный электронный сгусток (единственная электронная структура – виртуальный катод). Виртуальный катод совершает периодические (близкие к релаксационным) пространственно-временные осцилляции, определяющие дискретный спектр выходного излучения рассматриваемой системы (см. рис. 3, *a, б*).

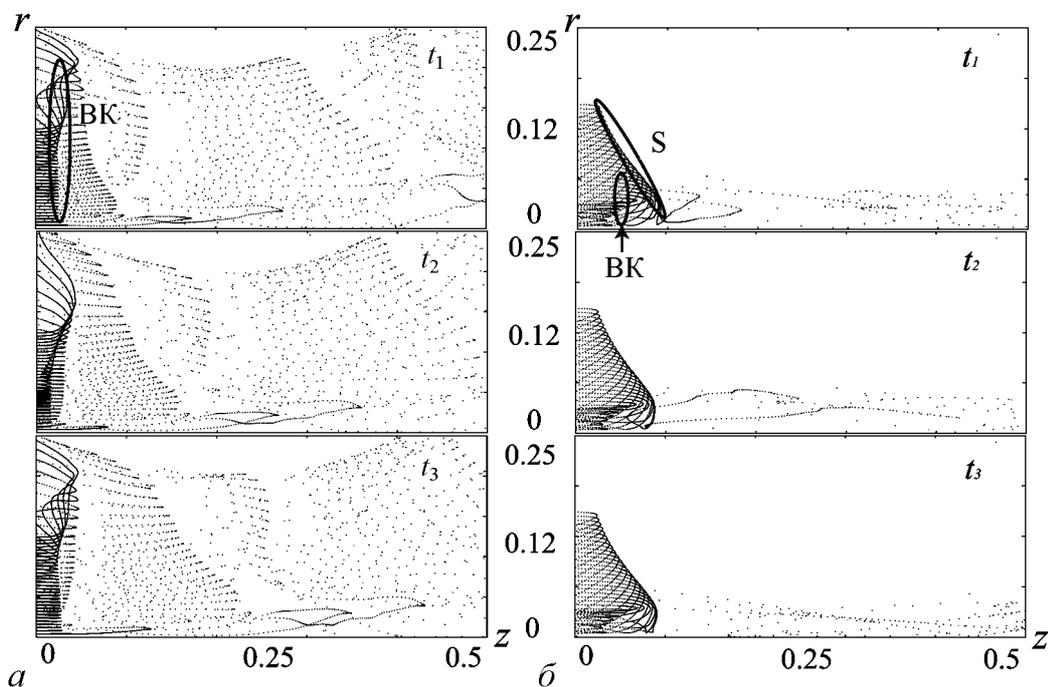


Рис. 4. Мгновенные конфигурационные портреты электронного потока в координатах  $(r, z)$  в различные последовательные моменты времени  $t_i$  в течение одного периода колебаний виртуального катода, построенные при  $\alpha = 20$  и  $z_m = 0$ , для малого  $B_0 = 6$  (*a*) и большого  $B_0 = 80$  (*б*) магнитного поля

С ростом величины внешнего фокусирующего магнитного поля, поперечная (радиальная) динамика заряженных частиц в системе оказывается ограниченной, и начинает преобладать динамика в продольном направлении (рис. 4, б, построенный при  $B_0 = 80$ ). Главная электронная структура (виртуальный катод) в данном случае формируется во внутренних слоях электронного потока, где тормозящие поля пространственного заряда достигают максимальных значений. Сильная неоднородность внешнего магнитного поля кольца вдоль радиальной оси системы приводит к тому, что внешние слои потока оказываются в значительно более сильном магнитном поле, по сравнению с внутренними слоями. При определённой амплитуде  $B_0$  внешнего магнитного поля (при безразмерном параметре  $B_0 > 20$ ) внешние слои электронного потока попадают в магнитную ловушку, которая приводит к тому, что траектории заряженных частиц данных слоёв сильно искривляются. Этот эффект приводит к формированию вторичной электронной структуры в системе – вторичного электронного сгустка, который выделен на рис. 4, б символом «S». Взаимодействие между главной и вторичной электронными структурами приводит к появлению внутренней обратной связи, что обуславливает хаотизацию колебаний виртуального катода в электронно-волновом генераторе с электронной обратной связью аналогично тому, как это было показано в работах [43–45, 48].

Рассмотрим теперь физические механизмы усложнения динамики электронного потока с виртуальным катодом в системе с несколькими магнитными кольцами в МПФС. Во-первых, необходимо отметить, что увеличение числа  $N$  магнитных колец в МПФС приводит к росту величины магнитного поля в области пространства дрейфа благодаря сложению магнитных полей каждого из магнитов системы. Во-вторых, распределение неоднородного магнитного поля вдоль пространства дрейфа становится существенно другим по сравнению со случаем единственного кольца (см. рис. 1, б и в). В случае МПФС с несколькими периодами распределение продольной компоненты магнитного поля на оси системы становится приблизительно синусоидальным (см., также [34, 51]). Как следствие, электронный поток, проходя через область виртуального катода к коллектору генератора, испытывает действие периодического магнитного поля, что приводит к существенным пульсациям пучка и значительному изменению траекторий частиц в области «виртуальный катод – коллектор».

Для визуализации динамики пучка в этом случае удобно воспользоваться анализом траекторий движения частиц с помощью построения пространственно-временных диаграмм электронного потока в пространстве дрейфа виркатора. Хорошо известно, что данный метод весьма эффективен для изучения особенностей динамики электронного потока с виртуальным катодом [45, 52]. Отметим, что в рассматриваемом случае неоднородного магнитного поля пространственно-временная динамика в различных слоях электронного потока существенно различна, поэтому будем рассматривать внутренние и внешние слои потока отдельно. Каждая заряженная частица с учетом аксиальной симметрии описывается тремя своими координатами  $(t, z, r)$  и рис. 5 демонстрирует проекцию траекторий выделенных крупных частиц (для каждого слоя показано примерно 5% частиц, использующихся в моделировании) для внутреннего и внешнего слоев на плоскость  $(t, z)$ .

Диаграммы на рис. 5, а, в, построенные для случая  $N = 1$ , показывают, что заряженные частицы как внешнего, так и внутреннего слоев, формируют нестаци-

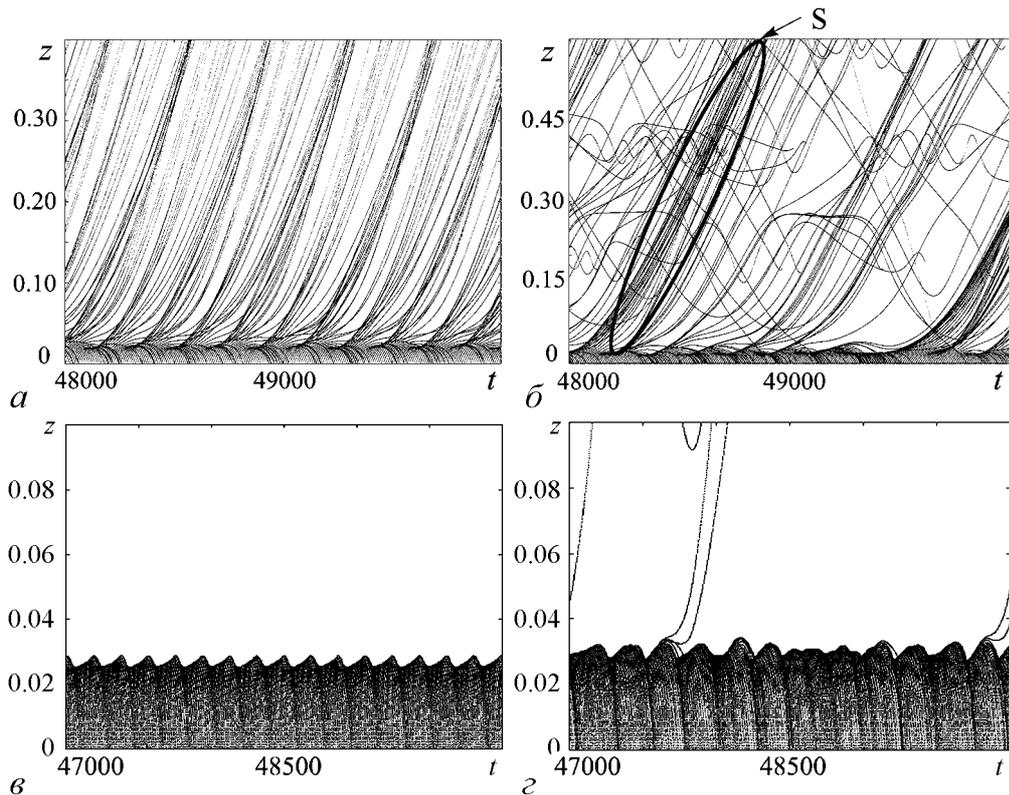


Рис. 5. Пространственно-временные диаграммы электронного потока в безразмерных координатах  $(t, z)$  для управляющих параметров  $\alpha = 20$ ,  $B_0 = 20$  различных  $N$ : 1 для внутреннего (а) и внешнего (в) слоев; 4 для внутреннего (б) и внешнего (г) слоев электронного потока

онарный виртуальный катод (электронный сгусток, растянутый вдоль оси времени  $t$  на рисунках), который демонстрирует колебательную динамику близкую к регулярной. Легко видеть, что виртуальный катод периодически отражает часть потока во внутреннем слое обратно к плоскости инъекции. В этом случае ток, проходящий через область виртуального катода, близок к постоянному значению, то есть пространственно-временная модуляция проходящего к коллектору потока достаточно мала. Во внешних слоях, в отличие от внутренних, наблюдается полное отражение потока от виртуального катода, и координата минимума потенциала (виртуального катода) совершает малые колебания в пространстве с течением времени.

С увеличением числа магнитных колец в МПФС (см. пространственно-временную диаграмму  $(t, z)$  на рис. 5, б, г для  $N = 4$ ) во внутренних слоях потока также формируется нестационарный колеблющийся виртуальный катод, однако, теперь проходящий ток оказывается сильно промодулированным во времени. МПФС с четырьмя магнитными кольцами формирует протяженную область с сильным неоднородным магнитным полем, которое приводит к нерегулярному формированию вторичных электронных сгустков (электронных структур) в проходящем потоке (отмечены символом «S» на рис. 5) во внутреннем слое электронного потока. Формирующиеся электронные структуры влияют на динамику основной электронной структуры (виртуального катода) через общее поле пространственного заряда в пространстве дрейфа. Такое взаимодействие между структурами приводит к формированию некоторой дополнительной внутренней обратной связи, которая способствует хаотизации

колебаний пространственного заряда в системе [53, 54]. Также данные нестационарные вторичные структуры в проходящем потоке возбуждают шумоподобные некогерентные колебания в выходной электродинамической структуре низковольтного виркатора. Как и в случае одного магнита ( $N = 1$ ) во внешнем слое, расположенном в большем магнитном поле, наблюдается полное отражение заряженных частиц, но колебания положения виртуального катода становятся нерегулярными, что также способствует дополнительной хаотизации выходного излучения генератора с электронной обратной связью с увеличением числа периодов МПФС.

Таким образом, на основе проведенного рассмотрения физических процессов в электронно-волновом генераторе с электронной обратной связью можно заключить, что увеличение величины магнитного поля одного магнита или увеличение числа периодов при использовании МПФС, усложняющее распределение магнитного поля в области формирования виртуального катода, приводит к формированию дополнительных электронных структур в системе, взаимодействие между которыми, в свою очередь, хаотизирует колебания пространственного заряда потока и, как следствие, расширяет полосу частот, генерируемых низковольтным виркаторм.

### 3. Физическая оптимизация процессов в генераторе с электронной обратной связью

Понимание физических процессов в системе, приводящих к хаотизации колебаний пространственного заряда во внешнем неоднородном магнитном поле и, как следствие, к расширению полосы генерируемых частот, позволяет оптимизировать параметры внешней фокусирующей магнитной системы с точки зрения достижения максимальной ширины и полосы генерируемых частот. Напомним, что основными параметрами, характеризующими исследуемую фокусирующую магнитную систему для генератора с электронной обратной связью, являлись число периодов  $N$  МПФС, параметр магнитного поля  $B_0$  и координата  $z_m$  первого магнитного кольца фокусирующей системы. Важной характеристикой генератора с электронной обратной связью является также ток пучка, характеризуемый безразмерным параметром  $\alpha$ , поэтому будем учитывать и этот параметр при проведении оптимизационных расчетов с помощью предложенной модели генератора.

Из рассмотрения, проведенного в предыдущем разделе, следует, что увеличение числа  $N$  магнитов МПФС и рост параметра магнитного поля  $B_0$  должно приводить к хаотизации выходного излучения генератора, которое выражается как в расширении полосы частот, так и в уменьшении изрезанности спектра мощности генерации.

Проанализируем эти процессы более подробно, для чего рассмотрим поведение системы на различных плоскостях управляющих параметров. Анализ и сопоставление карт режимов на плоскостях управляющих параметров позволит выявить наиболее интересные физически реализуемые режимы в системе и определить оптимальные параметры, соответствующие интересующим нас режимам.

Рис. 6 демонстрирует характерные режимы колебаний системы на плоскости параметров  $(z_m, B_0)$  для системы с одним кольцевым магнитом. Анализируя карты режимов, можно заключить, что изменение амплитуды и конфигурации (за счет изменения характера неоднородности поля в области виртуального катода

путем варьирования координаты  $z_m$  кольца) внешнего магнитного поля в области виртуального катода приводит к перестройке режимов колебаний в системе, которые характеризуются различным спектральным составом излучения. Вопрос о мощности генерируемого излучения будет рассмотрен в следующем разделе.

При величинах внешнего магнитного поля, соответствующих области Р на карте режимов, в системе наблюдается регулярная динамика виртуального катода (см., также рис. 3, *а,б* с характерным видом спектра мощности генерации и проекцией фазового портрета колебаний). Из рис. 6 следует, что регулярный режим динамики электронного

потока с виртуальным катодом возникает при малых амплитудах внешнего магнитного поля. С дальнейшим ростом амплитуды магнитного поля характер выходного электромагнитного излучения усложняется. Сначала электронный поток с виртуальным катодом начинает демонстрировать слабохаотический режим (область  $C_1$  на рис. 6; соответствующие ему спектры и фазовые портреты колебаний представлены на рис. 3, *в,г*), который может рассматриваться как переходный режим между периодической и развитой хаотической генерацией. Последний наблюдается при значительных параметрах  $B_0$  внешнего магнитного поля (область  $C_2$  на рис. 6).

Таким образом, для получения периодической генерации в системе с виртуальным катодом необходимо выбирать малые значения ведущего магнитного поля, для перехода к развитому хаосу требуется существенно увеличивать параметр неоднородного магнитного поля.

Изменение положения фокусирующей магнитной системы (координаты  $z_m$  кольцевого магнита) также существенно влияет на поведение выходного излучения генератора с электронной обратной связью. Общая тенденция такова, что смещение магнитного кольца в область формирования виртуального катода, то есть реализация в области виртуального катода неоднородного, увеличивающегося с радиусом магнитного поля с большой величиной  $B_0$  хаотизирует поведение выходного излучения. Механизм такой хаотизации в сильно неоднородном магнитном поле большой амплитуды был рассмотрен в предыдущем разделе.

Из рис. 6 хорошо виден характерный переход от периодической к хаотической генерации  $P \rightarrow C_1 \rightarrow C_2$  при увеличении координаты  $z_m$  магнита в пространстве дрейфа. Следует отметить простоту данного способа настройки генератора с электронной обратной связью, так как магнитные кольца одеваются на вакуумированное пространство взаимодействия генератора сверху, что позволяет легко перемещать магнитные кольца вдоль пространства дрейфа.

Интересно отметить область регулярной генерации в системе с малым током пучка  $\alpha = 20$  при  $z_m \approx 0.1$ , наблюдающуюся даже при больших величинах  $B_0$

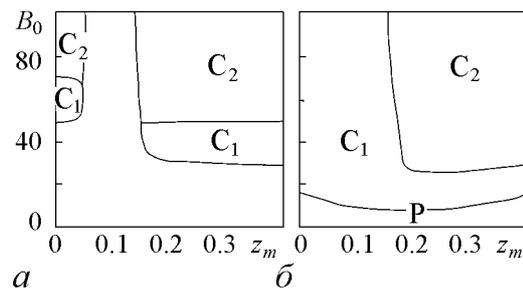


Рис. 6. Результаты расчета по оптимизации генератора с электронной обратной связью: анализ характерных режимов генерации в системе на плоскости управляющих параметров «координата магнитного кольца  $z_m$  – параметр магнитного поля  $B_0$ » ( $N = 1$ ) для различных управляющих параметров  $\alpha$ : *а* – 20 и *б* – 40. Здесь и далее «Р» – режим периодической генерации, « $C_1$ » и « $C_2$ » – режимы узкополосной и широкополосной хаотической генерации, соответственно

параметра магнитного поля (см. рис. 6, а). Это связано с особенностями распределения продольной компоненты магнитного поля намагниченного кольца, которое, как хорошо известно, на оси системы характеризуется кривой с одним максимумом в области центра кольца (типичное распределение показано на рис. 1, б). Положение магнитного кольца  $z_m \approx 0.1$  соответствует случаю, когда виртуальный катод формируется в области  $z_{вк} \approx 0.2$ , где аксиальное магнитное поле близко к нулю и меняет свой знак. Поэтому, рост параметра  $B_0$  в этом случае не приводит к существенному росту магнитного поля в области формирования виртуального катода. Как следствие, при малом токе пучка, при котором виртуальный катод демонстрирует регулярные колебания в сравнительно малом магнитном поле (см. область Р на карте режимов на рис. 6, а), мы наблюдаем регулярную генерацию в системе даже при больших величинах  $B_0$ . Изменение координаты  $z_m$  приводит к быстрому установлению развитой хаотической широкополосной генерации за счет попадания виртуального катода в область большого магнитного поля.

При бóльшем токе пучка этот эффект уже не выражен так ярко. Даже небольшое магнитное поле при бóльшем токе пучка приводит к возникновению хаотических режимов колебаний в системе. Это хорошо видно из сравнения рис. 6, а и б. Область периодической генерации при бóльшем токе пучка исчезает при существенно меньшей величине внешнего магнитного поля  $B_0$ , область периодической генерации при положении магнитного кольца  $z_m \approx 0.1$  также отсутствует, сменяясь режимом узкополосной хаотической генерации.

Таким образом, изменение тока пучка также является дополнительным фактором, который необходимо учитывать при проведении оптимизации характеристик генератора. Однако управление динамикой генератора путем изменения параметров магнитной фокусирующей системы является более простым способом, чем управление параметрами интенсивного электронного пучка.

Рассмотрим теперь результаты расчетов и оптимизации характеристик генерации при увеличении числа  $N$  периодов в магнитной фокусирующей системе. Для определения наиболее оптимальных режимов колебаний были изучены типичные режимы на плоскости управляющих параметров «число  $N$  периодов МПФС – параметр  $B_0$  магнитного поля», которая показана на рис. 7. Из представленной карты режимов можно видеть, что регулярная генерация наблюдается при малых величинах параметра внешнего магнитного поля  $B_0$ , что совпадает с результатами предыдущего рассмотрения системы с одним кольцевым магнитом. С увеличением числа магнитных колец в МПФС и величины параметра  $B_0$  характер выходного излучения становится все более сложным (см., например, рис. 3, в,г и д,е), и система последовательно демонстрирует режимы узкополосной  $C_1$

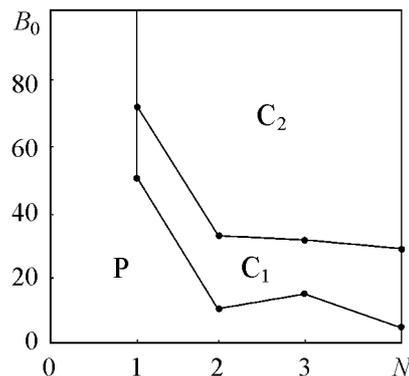


Рис. 7. Результаты расчета по оптимизации генератора с электронной обратной связью и МПФС: анализ характерных режимов генерации в системе на плоскости управляющих параметров «число периодов  $N$  МПФС – параметр магнитного поля  $B_0$ » для управляющих параметров  $\alpha = 20$  и  $z_m = 0.2$

и широкополосной  $C_2$  хаотической генерации. На рис. 7 построена карта режимов для максимального числа периодов МПФС  $N = 4$ . Дальнейшее увеличение числа  $N$  не приводит к изменению поведения системы. Это понятно, так как низковольтный виркатор характеризуется сравнительно коротким пространством взаимодействия и основную роль в выходное излучение вносит динамика пространственного заряда в ограниченной области пространства дрейфа, где происходит формирование виртуального катода. Поэтому анализ периодических фокусирующих магнитных систем с числом периодов  $N > 6$  не проводился, а на карте режимов для наглядности показаны результаты для  $N = 0...4$ . Полученные результаты показывают, что оптимальное число магнитных колец в МПФС для достижения широкой полосы генерируемых частот в рассматриваемом случае соответствует  $N = 2 \div 4$ . При этих значениях наблюдается широкая полоса генерируемых частот (порядка  $0.5 \div 1$  октавы) и не требуется использование лишних магнитных колец, которые усложняют и утяжеляют конструкцию прибора.

#### 4. Расчет и оптимизация мощности выходного широкополосного излучения

В предыдущем разделе статьи были рассмотрены вопросы анализа оптимальных параметров генератора с электронной обратной связью для достижения максимальной ширины полосы генерируемого хаотического излучения. Другим важным вопросом оптимизации генератора хаоса СВЧ-диапазона с электронной обратной связью, как уже обсуждалось во введении, является вопрос о получении максимальной выходной мощности выходного излучения.

Учитывая широкополосный характер выходного поля, рассматривалась интегральная мощность излучения, которая определялась путем усреднения выходного сигнала в течении определенного интервала времени (времени расчета  $T$ ). Следует отметить, что параметры выходной электродинамической системы были выбраны в соответствии с результатами предыдущего анализа (см. работы [13, 39]). Результаты оптимизационных расчетов выходной мощности виркатора показаны на следующих иллюстрациях. Для поиска оптимальных параметров генератора, соответствующих максимальной выходной мощности, использовался метод математической оптимизации (квазиньютоновский метод [19]) с функцией цели в виде интегральной мощности выходного излучения.

Удобно рассмотреть результаты такой оптимизации, анализируя зависимости интегральной выходной мощности  $P$  от параметров генератора. Рассмотрим здесь зависимости  $P$  от параметра магнитного поля, координаты  $z_m$  и числа  $N$  периодов МПФС.

На рис. 8 показана зависимость нормированной выходной мощности от параметра  $B_0$  магнитного поля для генератора с магнитной системой с одним кольцевым магнитом для двух значений тока пучка. Видно, что зависимости демонстрируют схожее поведение.

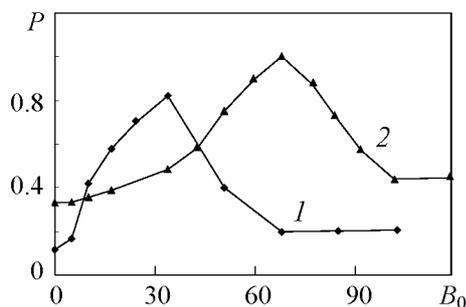


Рис. 8. Зависимость нормированной выходной мощности от параметра  $B_0$  магнитного поля для генератора с магнитной системой с одним кольцевым магнитом для токов пучка  $\alpha$ : 1 – 10; 2 – 20

Во-первых, для обоих токов существует оптимальная амплитуда внешнего магнитного поля  $B_{\text{опт}}$ , при которой мощность выходного излучения максимальна. При  $B_0 < B_{\text{опт}}$  с ростом амплитуды внешнего магнитного поля выходная мощность монотонно увеличивается. Напротив, при  $B_0 > B_{\text{опт}}$  наблюдается монотонное уменьшение выходной мощности. Во-вторых, при больших параметрах магнитного поля  $B_0$  наблюдается насыщение мощности выходного излучения на низком уровне.

Такое обнаруженное в ходе проведенной математической оптимизации генератора поведение зависимостей мощности  $P$  выходного излучения от параметра  $B_0$  внешнего магнитного поля является следствием физических процессов, происходящих в системе при изменении неоднородного магнитного поля. При  $B_0 < B_{\text{опт}}$  вследствие значительных сил кулоновского расталкивания в области виртуального катода в пучке преобладает поперечная динамика заряженных частиц к боковой стенке пространства дрейфа, поэтому главная электронная структура (виртуальный катод) в данном случае оказывается сильно растянутой вдоль радиального направления и характеризуется малой плотностью пространственного заряда. Мощность выходного излучения пропорциональна плотности пространственного заряда электронного сгустка, возбуждающего систему, и в рассматриваемом случае она также будет невелика. С ростом величины магнитного поля поперечная динамика заряженных частиц в системе ограничивается, и плотность пространственного заряда в области виртуального катода возрастает. Как следствие, увеличивается мощность выходного излучения (см. рис. 8). При  $B_0 \approx B_{\text{опт}}$  поперечная динамика в системе оказывается практически подавленной фокусирующим магнитным полем, и выходная мощность достигает максимального значения. С дальнейшим ростом величины внешнего магнитного поля ( $B_0 > B_{\text{опт}}$ ) часть заряженных частиц (в основном из внешних слоев) оказываются захваченными магнитной ловушкой. Данные частицы формируют вторичный электронный сгусток и перестают участвовать в осцилляциях виртуального катода, не возбуждая выходную электродинамическую систему. Это приводит к уменьшению мощности выходного излучения в системе. Количество таких частиц увеличивается с ростом амплитуды внешнего магнитного поля, и следовательно, выходная мощность уменьшается.

Как можно видеть из рис. 8, величина оптимального магнитного поля  $B_{\text{опт}}$  увеличивается с ростом безразмерного параметра тока пучка  $\alpha$  (ср. кривые 1 и 2). Очевидно, что расталкивающие силы пространственного заряда увеличиваются

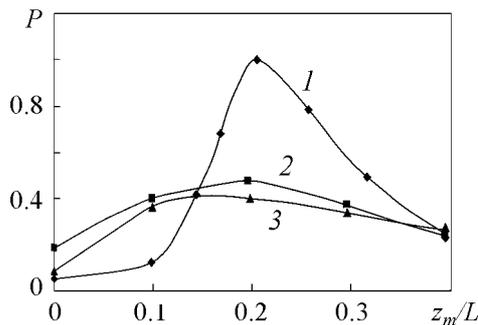


Рис. 9. Зависимости нормированной выходной мощности от координаты магнитного кольца  $z_m$  для генератора с одним кольцевым магнитом для  $B_0 = 40$  и различных токов пучка  $\alpha$ : 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30

с ростом тока электронного пучка, который пропорционален  $\alpha^2$ , поэтому оптимальное магнитное поле  $B_{\text{опт}}$ , требующееся для ограничения поперечной (радиальной) динамики заряженных частиц потока и формирования плотного электронного сгустка в области виртуального катода, растет тоже.

Рассмотрим теперь зависимость мощности выходного излучения от координаты  $z_m$  кольца, создающего фокусирующее магнитное поле. На рис. 9 показаны соответствующие зависимости для различных токов пучка. Все зависи-

мости демонстрируют схожее поведение. Существует оптимальная позиция магнитного кольца, при которой выходная мощность максимальна. Физический механизм поведения данной зависимости подобен физическому механизму существования оптимального магнитного поля  $B_{\text{опт}}$  и связан с существенной неоднородностью внешнего магнитного поля в области виртуального катода. Действительно, имеется такое расположение кольца, создающего фокусирующее магнитное поле, при котором поперечная динамика электронного потока существенно ограничена сильным магнитным полем и в то же время заряженные частицы еще не оказываются захваченными в магнитную ловушку, связанную с неоднородностью магнитного поля в поперечном направлении. Такое положение магнитного кольца соответствует оптимальной координате  $z_{\text{опт}}$ , при которой интегральная выходная мощность максимальна. Следует отметить, что магнитное поле на оси системы в области виртуального катода при координате магнитного кольца  $z = z_{\text{опт}}$  близко к величине оптимального магнитного поля  $B_{\text{опт}}$ .

Наконец, рассмотрим кратко характерные зависимости выходной мощности от числа  $N$  периодов МПФС, которые показаны на рис. 10 для различных значений параметра внешнего магнитного поля  $B_0$  и тока пучка  $\alpha$ . Из представленных на рисунке данных хорошо видно, что выходная мощность монотонно уменьшается с ростом числа периодов МПФС и стремится с ростом  $N$  к постоянной величине. Как было показано выше в ходе оптимизации спектральных характеристик генератора с электронной обратной связью, характер выходного излучения усложняется с ростом числа  $N$  магнитных колец. Таким образом, усложнение спектрального состава выходного электромагнитного излучения, которое, как было показано выше, определяется расширением спектра генерируемых частот, сопровождается уменьшением мощности выходного излучения (а следовательно, КПД генератора). Как видно из рис. 10, выходная мощность уменьшается с ростом числа магнитных колец МПФС в 2–3 раза по сравнению со случаем отсутствия внешнего фокусирующего магнитного поля. Следует отметить, что данные результаты находятся в хорошем соответствии с известными экспериментальными и теоретическими результатами исследования влияния внешнего однородного магнитного поля на КПД и выходную мощность виркатора. В частности, в работах [13,27,39,55] было показано, что увеличение внешнего продольного магнитного поля приводит к уменьшению эффективности и выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом.

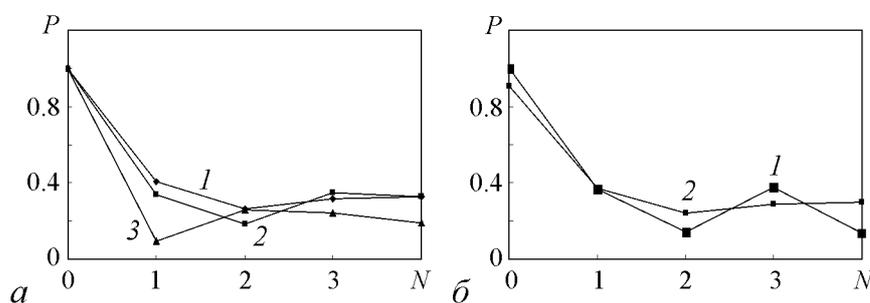


Рис. 10. Зависимости нормированной выходной мощности от числа  $N$  периодов МПФС для различных значений токов пучка  $\alpha$  и параметра магнитного поля  $B_0$ :  $a - \alpha = 20.0$  для  $B_0$  равных 20.0 (1), 40.0 (2), 60.0 (3);  $b - B_0 = 20.0$  для  $\alpha$  равных 10.0 (1), 20.0 (2)

Таким образом, можно сделать вывод, что условия, накладываемые на оптимизацию генератора с электронной обратной связью, не могут одновременно обеспечить максимум выходной мощности и максимум ширины полосы выходного излучения. Максимальная выходная мощность в системе с одним кольцевым магнитом реализуется при сравнительно узкой полосе генерируемых частот, оптимальные значения параметров магнитной системы при  $N = 1$  и безразмерном параметре тока  $\alpha = 20$ , при которых наблюдается максимальная выходная мощность, соответствуют  $B_0 \approx 70$  и  $z_m = 0.18$ . При меньшем токе пучка  $\alpha = 10$  оптимальные значения параметров:  $B_0 \approx 30$  и  $z_m = 0.2$ . Увеличение магнитного поля или увеличение числа периодов МПФС, при котором спектр выходного излучения расширяется и становится менее изрезанным, сопровождается резким уменьшением интегральной мощности СВЧ-излучения, которая уменьшается в 2–3 раза по сравнению со случаем периодической генерации (при  $B_0 = 0$  или  $N = 0$ ). В режиме широкополосной генерации выходная мощность излучения слабо зависит от параметров магнитной фокусирующей системы генератора с электронной обратной связью. Поэтому в режимах широкополосной генерации можно не проводить оптимизацию генератора по выходной мощности, а подбирать параметры МПФС из соображений оптимальных спектральных характеристик выходного излучения.

### Заключение

В работе в рамках численного двумерного моделирования исследована нелинейная динамика и проведена оптимизация параметров генератора с электронной обратной связью для генерации широкополосных хаотических сигналов. Обнаружено сильное влияние характеристик внешнего неоднородного магнитного поля на нелинейную динамику электронного потока с виртуальным катодом в низковольтном виркаторе. Изучены физические процессы, ответственные за обнаруженную зависимость динамики электронного потока с виртуальным катодом от параметров внешнего неоднородного магнитного поля. Исследованы зависимости выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом от характеристик внешнего неоднородного магнитного поля. Проведена оптимизация параметров магнитной периодической фокусирующей системы генератора для достижения максимальной ширины полосы и мощности хаотической генерации.

*Работа поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также грантами РФФИ (проекты №№ 09-02-00255, 10-02-90002).*

### Библиографический список

1. Короновский А.А., Трубецков Д. И., Храмов А.Е. Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.

3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
4. Анфиногентов В.Г., Калинин Ю.А. Экспериментальное исследование колебательных явлений в электронном пучке с виртуальным катодом // Лекции по СВЧ-электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Книга 2. 1996. С. 83.
5. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Вакуумные генераторы широкополосных хаотических колебаний на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом // Изв. РАН, сер. физич. 2005. Т. 69, № 12. С. 1724.
6. 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. Т. 31, № 11. С. 1009.
7. Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Калинин Ю.А. Электровакуумный прибор СВЧ-диапазона: Патент на изобретение № 2288518, 2006. Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС, 2006.
8. Meadows B.K., Heath T.H., Neff J.D., et al. Nonlinear antenna technology // Proceedings IEEE. 2002. Vol. 90, № 5. P. 882.
9. Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
10. Dmitriev B.S., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Starodubov A.V., Trubetskov D.I., Zharkov Y.D. First experimental observation of generalized synchronization phenomena in microwave oscillators // Physical Review Letters. 2009. Vol. 102, № 7. P. 074101.
11. Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 12. С. 1281.
12. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
13. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование зависимости мощности СВЧ-генерации низковольтного виркатора от управляющих параметров // ЖТФ. 2007. Т. 77, № 10. С. 139.
14. Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование широкополосных хаотических СВЧ-колебаний в гибридной системе «лампа бегущей волны – коллектор-генератор» // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 5. С. 83.
15. Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. СВЧ-генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 53.
16. 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. P. 033106.

17. Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н. Сверхширокополосные генераторы шумоподобных высокочастотных и сверхвысокочастотных колебаний с электронной обратной связью // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 3. С. 39.
18. Кураев А.А., Трубецков Д.И. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1: Стационарные процессы. М.: Физматлит, 2009.
19. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Мн.: БГУИР, 2007.
20. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. Мн.: Навука і тэхніка, 1990.
21. Nikolov N.A., Kostov K.G., Spassovsky I.P., Spassov V.A. High-power microwave generation from virtual cathode in foilless diode (vircator) // Electronics Letters. 1988. Vol. 24, № 23. P. 1445.
22. Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassovsky I.P., Spassov V.A. Experimental study of virtual cathode oscillator in uniform magnetic field // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60, № 21. P. 2598.
23. Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassov V.A. Excitation of transverse electric modes in axially extracted virtual cathode oscillator // Electronics Letters. 1993. Vol. 29, № 12. P. 1069.
24. Kostov K.G., Nikolov N.A. Microwave generation from an axially extracted virtual cathode oscillator with a guide magnetic field // Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1, № 4. P. 1034.
25. 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. Т. 19, № 4. С. 530.
26. Kostov K.G., Yovchev I.G., Nikolov N.A. Numerical investigation of microwave generation in foilless diode vircator // Electron Letters. 1999. Vol. 35, № 19. P. 1647.
27. Jiang W., Kitano H., Huang L., Masugata K., Yatsui K. Effect of longitudinal magnetic field on microwave efficiency of virtual cathode oscillator // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. Vol. 24. P. 187.
28. Егоров Е.Н., Храмов А.Е. Исследование хаотической динамики в электронном пучке с виртуальным катодом во внешнем магнитном поле // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 8. С. 742.
29. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Morozov M.Yu., Mushtakov A.V. Effect of external magnetic field on critical current for the onset of virtual cathode oscillations in relativistic electron beams // Phys. Lett. A. 2008. Vol. 372. P. 876.
30. Морозов М.Ю., Храмов А.Е. Влияние внешнего магнитного поля на величину критического тока электронного пучка, при котором формируется виртуальный катод // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 7. С. 610.
31. Singh G., Chaturvedi S. Secondary virtual-cathode formation in a low-voltage vircator: PIC simulations // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. Vol. 36, № 3. P. 694.
32. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Особенности СВЧ-генерации в виркаторе с неоднородным магнитным полем в области взаимодействия // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, № 13. С. 64.

33. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Хаотизация колебаний виртуального катода во внешнем магнитном поле, создаваемом кольцевым магнитом // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1736.
34. Алимовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
35. Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
36. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma physics, via computer simulation. NY: McGraw-Hill, 1985.
37. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003.
38. Morey I.J., Birdsall C.K. Travelling-wave-tube simulation: the IBC code // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18, № 3. P. 482.
39. 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. Т. 32, № 9. С. 71.
40. Анфиногентов В.Г. Хаотические колебания в электронном потоке с виртуальным катодом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 69.
41. Анфиногентов В.Г. Взаимодействие когерентных структур и хаотическая динамика в электронном потоке с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21, № 8. С. 70.
42. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. Сложное поведение электронного потока с виртуальным катодом и генерация хаотических сигналов в виртуальных системах // Изв. РАН, сер. физич. 1997. Т. 61, № 12. С. 2391.
43. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. К вопросу о механизме возникновения хаотической динамики в вакуумном СВЧ-генераторе на виртуальном катоде // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. XLI, № 9. С. 1137.
44. Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование когерентных структур в электронном пучке со сверхкритическим током с помощью вейвлетной бикогерентности // Физика плазмы. 2002. Т. 28, № 8. С. 722.
45. 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 поле // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 11. С. 51.
46. Храмов А.Е., Короновский А.А., Левин Ю.И. Исследование процессов структурообразования в электронном пучке с виртуальным катодом с помощью вейвлетной бикогерентности // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, № 13. С. 57.
47. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Процессы образования и нестационарная динамика виртуального катода в нерелятивистском электронном пучке в тормозящем поле (двумерное приближение) // Известия вузов. Радиофизика. 2006, № 10.
48. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейная динамика и хаотизация колебаний виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле // Физика плазмы. 2009. Т. 35, № 8. С. 684.

49. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Формирование и динамика виртуального катода в трубчатом электронном пучке во внешнем магнитном поле // ЖТФ. 2009. Т. 79, № 10. С. 119.
50. 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.
51. *Tsimring S.E.* Electron beams and microwave vacuum electronics. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
52. Селемир В.Д., Алёхин Б.В., Ватрунин, В.Е., Дубинов А.Е., Степанов Н.В., Шамро О.А., Шибалко К.В. Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-приборов с виртуальным катодом // Физика плазмы. 1994. Vol. 20, № 7,8. P. 689.
53. *Brandt H.E.* The turbutron // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. Т. 13, № 6. С. 513.
54. *Trubetskov D.I., Mchedlova E.S., Anfinogentov V.G., Ponomarenko V.I., Ryskin N.M.* Nonlinear waves, chaos, patterns in microwave devices // Chaos. 1996. Т. 6, № 3. С. 358.
55. *Davis H.A., Bartsch R.R., Kwan T.J.T., Sherwood E.G., Stringfield R.M.* Experimental confirmation of the reitron concept // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. Vol. 16, № 2. P. 192.

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

*Поступила в редакцию 10.02.2010  
После доработки 8.04.2010*

**WIDEBAND CHAOTIC GENERATION AND OPTIMIZATION  
OF CHARACTERISTICS IN MICROWAVE GENERATOR  
WITH ELECTRONIC FEEDBACK AND MAGNETIC  
PERIODIC FOCUSING SYSTEM**

*S.A. Kurkin, A.A. Koronovskii, Yu.I. Levin, A.E. Hramov*

With the help of 2D numerical model it has been investigated the nonlinear dynamics and generation of wideband chaotic signals in the generator based on electron beam with the virtual cathode. It has been discovered the strong influence of the external non-uniform magnetic field on the nonlinear dynamics of the virtual cathode in the system. It has been analyzed the physical processes responsible for the discovered dependency of dynamics of the electron beam with the virtual cathode on the parameters of the external non-uniform magnetic field. The dependencies of the output generation power in the system with virtual cathode on the characteristics of the external non-uniform magnetic field were investigated. Optimization of the parameters of magnetic periodic focusing system of the generator for the maximum bandwidth and power of the chaotic generation was carried out.

*Keywords:* Microwave generator, intensive electron beam, virtual cathode, nonlinear dynamics, microwave electronics, vircator, non-uniform magnetic field, physical and mathematical optimization, numerical simulation, particle method.



*Куркин Семён Андреевич* – родился в Саратове (1986). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности радиофизика и электроника (2008). Аспирант и ассистент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Имеет 8 публикаций в центральных реферируемых журналах, участник Всероссийских и Международных конференций. Область научных интересов – исследование электронно-волновых систем с интенсивными пучками заряженных частиц, изучение нелинейной динамики виртуального катода, а также генераторов, основанных на колебаниях виртуального катода (виркаторов).

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



*Левин Юрий Иванович* – родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ, деканом факультета нелинейных процессов. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: levin@nonlin.sgu.ru