



ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА

В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов

В работе при помощи численного моделирования рассмотрена сложная динамика электронного потока с виртуальным катодом и внутренней распределенной обратной связью. Исследованы характеристики сложной динамики виртуального катода. Для системы со связью через электронный поток рассмотрено формирование различных типов автоструктур. Показано, что усложнение колебаний виртуального катода связано с увеличением связи между структурами. Для системы со связью через электромагнитное поле (виркатор-ЛОВ) исследованы процессы структурообразования и показано, что подавление вторичной структуры в потоке за счет взаимодействия виртуального катода с полем обратной волны позволяет управлять характеристиками выходного излучения.

Введение

В настоящее время активно изучаются приборы с виртуальным катодом – виркаторы. Виртуальный катод (ВК) формируется, когда в пространство взаимодействия инжектируется ток больше предельного для данной геометрии. ВК представляет собой область, отражающую часть электронов к входу в систему. Наибольший интерес подобные приборы привлекают как источники мощного СВЧ излучения (до 20 ГВт импульсной мощности). Вместе с тем их исследование представляет большой теоретический интерес, так как электронный поток с ВК представляет собой автоколебательную распределенную нелинейную систему. Нерегулярная динамика колебаний ВК наблюдалась еще в первых компьютерных экспериментах [1]. Последние экспериментальные и теоретические результаты (см., например, обзоры [2,3]) свидетельствуют о наличии сложного поведения, включающего детерминированный хаос, в системах с ВК.

Представляет большой интерес анализ возможности управления колебаниями ВК при помощи обратной связи. В виркаторе использование внешней обратной связи позволило эффективно управлять частотой и мощностью излучения [4]. Как известно, добавление запаздывающей обратной связи может приводить к сложному поведению в относительно простых системах [5,6]. Анализ сложной динамики простой модели с ВК показал, что изменение параметров внешней запаздывающей обратной связи позволяет эффективно управлять сложной динамикой системы с ВК [7].

Большой интерес представляет исследование динамики в системах с ВК и внутренней обратной связью. В настоящее время исследуются подобные схемы приборов с ВК. В них внутренняя связь возникает как по току – за счет

возникновения нескольких ВК, так и по полно. Однако исследований влияния внутренней обратной связи на сложную динамику электронного потока с ВК, судя по известной нам литературе, не проводилось. В настоящей работе рассмотрены два варианта введения внутренней обратной связи. Первый из них связан с формированием в системе двух ВК и отражением части частиц от второго ВК в область первого. Во втором варианте виркатор представляет собой источник электронного потока для лампы обратной волны, сигнал которой воздействует на ВК.

1. Связь по потоку. Влияние отражений в потоке на динамику триодной системы с виртуальным катодом

1.1. Исследуемая система. Для численного моделирования взаимодействия двух виртуальных катодов и влияния отражений от ВК на динамику электронного потока была рассмотрена модель двух плоских диодных промежутков l_1 и l_2 с общей средней сеткой. Средняя сетка предполагается абсолютно непрозрачной для поля, что уменьшает влияние связи между виртуальными катодами через общее поле пространственного заряда. Невозмущенный пространственный заряд потока полностью скомпенсирован. Поступающий в систему поток имеет постоянную плотность заряда ρ_0 и скорость v_0 . Рассматривается одномерная модель электронного потока. Частицы, достигающие входной или коллекторной сетки, поглощаются, а проходящие через среднюю сетку уменьшают свой заряд в g раз. Динамика крупных частиц определяется решением на каждом шаге по времени нерелятивистских уравнений движения

$$dx_i/dt = v_i, \quad (1)$$

$$dv_i/dt = -q_i E_{\Sigma}(x_i)/m, \quad (2)$$

где

$$E_{\Sigma} = E(x_i) + E_0(x_i).$$

Здесь x_i – координата i -ой частицы; v_i – ее скорость и q_i – заряд; $E(x_i)$ – суммарное поле пространственного заряда, действующее в точке с координатой x_i ; $E_0(x_i)$ – внешнее электрическое поле. Первая диодная секция является эквипотенциальной, для управления плотностью потока, отраженного от второго ВК, к выходной сетке прикладывается тормозящий потенциал ϕ_0 . В первой диодной секции $E_0=0$, во второй – $E_0=-\phi_0/l_2$. Поле E определялось как $E=-\partial\phi/\partial x$, где ϕ – потенциал поля пространственного заряда. Он удовлетворяет уравнению

$$d^2\phi/dx^2 = \alpha_j^2(1 - \rho(x)), \quad (3)$$

где $\alpha_j = \omega_p l_j / v_0$ – параметр Пирса; $j=1,2$ – номер секции; $\rho(x)$ – текущая плотность заряда в электронном потоке, определяемая методом *particle-in-cell* (PIC); $\omega_p = (\eta|\rho_0|/\epsilon_0)^{1/2}$ – плазменная частота инжектируемого потока.

Параметрами задачи являются α , l_1/l_2 , g , ϕ_0 . Динамика триодной системы с двумя виртуальными катодами была проанализирована для фиксированных значений геометрического параметра $l_2/l_1=1$ и прозрачности сетки $g=0.9$. Параметр α изменялся от π до 2π , что обеспечивало формирование ВК в первом диодном промежутке в результате неустойчивости Пирса. Прошедший через первый ВК поток попадал во вторую секцию, имея меньшую плотность и большую скорость, что обеспечивало эффективное значение α на входе во вторую секцию около π . Во второй секции также образовывался ВК, и отраженный от него поток возвращался обратно в первую секцию.

Наибольшее отличие движения частиц в триодной системе по сравнению с

диодом связано с формированием потенциальной ямы между первым ВК и выходной сеткой. В триодной системе существуют частицы, захваченные в эту потенциальную яму. В отличие от системы, рассмотренной в [8], в данном случае потенциальная яма имеет сложную форму, так как в ней расположена средняя сетка системы, потенциал на которой остается постоянным. Частица, прошедшая через первый ВК, ускоряется в промежутке «ВК – средняя сетка» и, пройдя ее, попадает в тормозящее поле второго ВК, далее захватывается в потенциальную яму между виртуальными катодами и совершает там колебательное движение. Вместе с тем число частиц, отражающихся от первого ВК, остается значительным.

1.2. Карта режимов. В процессе численного моделирования были получены реализации колебаний потенциала в области первого ВК и электрического поля на выходе системы. По реализациям рассчитывались спектры мощности, восстанавливались аттракторы в псевдофазовом пространстве и определялись различные динамические характеристики (максимальный ляпуновский характеристический показатель (ЛХП), корреляционная размерность, различные функции распределения). Анализ проводился для значений α/π от 1 до 2 и φ_0 от 0 до 1.

Динамика ВК является колебательной для всех исследованных значений φ_0 и α/π . Представленная на рис. 1 карта режимов построена на основании анализа реализаций потенциала в области первого ВК, их спектров мощности и фазовых проекций. Выбор данной характеристики связан с тем, что во многих типах виркаторов электромагнитные колебания в выходных каскадах возбуждаются колебаниями тока в области ВК (их амплитуда максимальна в этой области). В результате характеристики выходного излучения определяются динамикой ВК.

На карте режимов можно выделить три большие области с качественно различной динамикой. Область 1 – это область собственных сложных колебаний ВК; характерный для нее фазовый портрет в пространстве (x, v) показан на рис. 2, а. В этом режиме прошедший через первый ВК поток обладает скоростью большей скорости инжекции, так как он ускорен полем первого ВК, и эффективное значение α на входе во вторую диодную секцию в среднем по времени меньше π . Второй ВК возникает не на каждом периоде колебаний вблизи выходной сетки системы. При этом наличие второй секции практически не оказывает влияния на колебания ВК.

При увеличении φ_0 система переходит в область 2 на плоскости параметров, где колебания ВК близки к регулярным. Фазовый портрет пучка, типичный для этой области, показан на рис. 2, б. Отражение потока от второго ВК существует постоянно, причем средние значения потенциалов близки в областях первого и второго ВК. В результате частицы колеблются в симметричной потенциальной яме около средней сетки, двигаясь по близким траекториям. На фазовом портрете

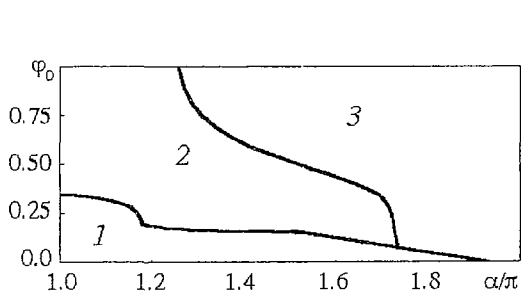


Рис. 1. Карта режимов на плоскости (параметр тока пучка α – потенциал отражателя φ_0)

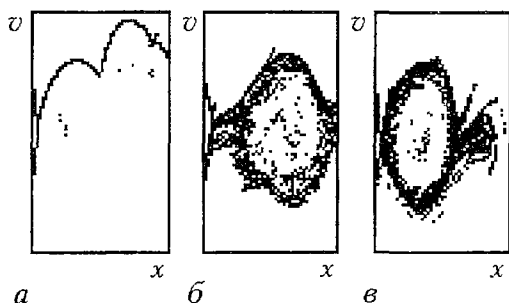


Рис. 2. Мгновенные фазовые портреты пучка в пространстве (x, v) для различных динамических режимов: а – соответствует режиму 1; б – 2; в – 3

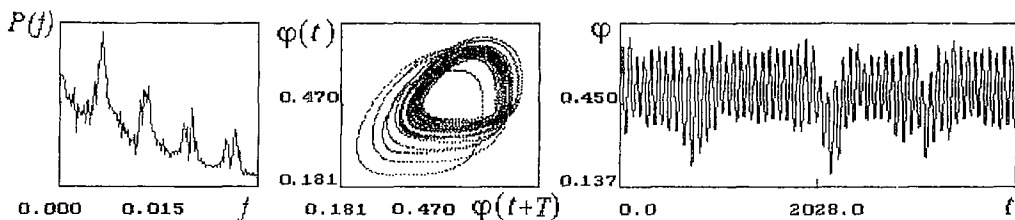


Рис. 3. Спектр мощности, восстановленный аттрактор и реализация колебаний потенциала в области ВК для режима 3 в пространстве параметров

пучка это проявляется в виде симметричного кольца, охватывающего среднюю сетку.

Дальнейшее увеличение ϕ_0 приводит к переходу на плоскости параметров в область 3 сильно нерегулярного поведения. Типичный фазовый портрет показан на рис. 2, в. Потенциальная яма, окружающая среднюю сетку, является несимметричной (второй ВК прижат к средней сетке). В результате частицы накапливаются в области между ВК и средней сеткой в течение нескольких периодов колебаний, а затем вихрь, охватывающий среднюю сетку, смещается как целое, приводя к сильному возмущению динамики ВК. Колебания ВК при этом подобны перемежаемости [9]. Типичный спектр мощности и реализация показаны на рис. 3. Заметен характерный для перемежаемости выброс в низкочастотной части спектра.

Анализ максимального ЛХП, вычисленного по алгоритму Вольфа [10] из реализаций колебаний потенциала в области ВК, показывает, что максимальный ЛХП положителен во всех характерных режимах колебаний. Это свидетельствует о разбегании траекторий на аттракторе и наличии хаотической динамики ВК. Хаотическое поведение в системе с многократным прохождением электронным потоком пространства взаимодействия может возникать как в результате сложной динамики ВК, так и в результате усиления собственных шумов потока, связанных с рассеянием на ВК.

Для выяснения вопроса о динамической или стохастической природе хаотических колебаний ВК были рассмотрены размерности восстановленных аттракторов. Их определение с помощью алгоритма Гроссбергера – Прокаччио [11] показывает, что для областей 2 и 3 колебаний ВК насыщение размерности происходит при размерности пространства вложения $m \geq 7$, что свидетельствует о динамической природе сложного поведения ВК. При этом размерность восстановленного аттрактора $D \approx 2$, то есть в фазовом пространстве он

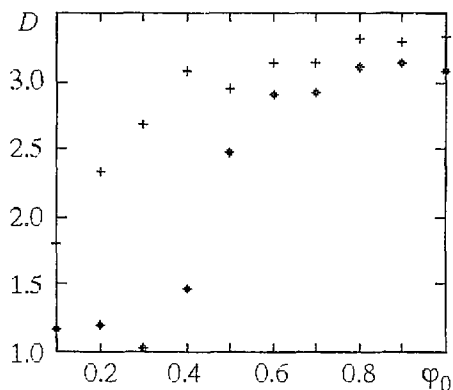


Рис. 4. Зависимость размерности, усредненной по конечному значению масштаба наблюдения, от потенциала выходной сетки; \blacklozenge – $\alpha/\pi=1.2$; $+$ – $\alpha/\pi=1.6$

представляет собой ленту. Мерой сложности колебаний ВК может служить усредненная в некотором диапазоне размерность восстановленного аттрактора. На рис. 4 показано усредненное значение размерности D для $\alpha/\pi=1.2$ и $\alpha/\pi=1.6$ при значениях ϕ_0 , соответствующих областям 2 и 3. С ростом ϕ_0 размерность колебаний возрастает. Это дает возможность управлять сложностью колебаний в системе при помощи изменения потенциала отражающей сетки.

1.3. Структуры и обратная связь. Структуры, формирующиеся в электронном потоке, были выделены на основе анализа усредненных по многим

периодам колебаний функций распределения $\langle f(x,v) \rangle$. На рис. 5 представлены проекции $\langle f(x,v) \rangle$ для различных динамических режимов на плоскости параметров (α, φ_0) .

Для значений параметров $\alpha/\pi=1.2$ и $\varphi_0=0.1$, характерных для режима 1 колебаний ВК, можно видеть (рис. 5, а), что $\langle f(x,v) \rangle \neq 0$ только при $v > 0$, за исключением области $x < x_{\text{ВК}}$, где $x_{\text{ВК}}$ – координата точки, в которой формируется первый ВК. В этом случае постоянная обратная связь по потоку между диодными секциями отсутствует, и наличие второй диодной секции не оказывает влияния на колебания ВК в первой эквипотенциальной секции.

Для значений $\alpha/\pi=1.2$ и $\varphi_0=0.5$, характерных для режима 2, в системе формируется новый тип движения – вихрь в фазовом пространстве (рис. 5, б). Ему соответствует колебание частиц вблизи средней сетки с периодом

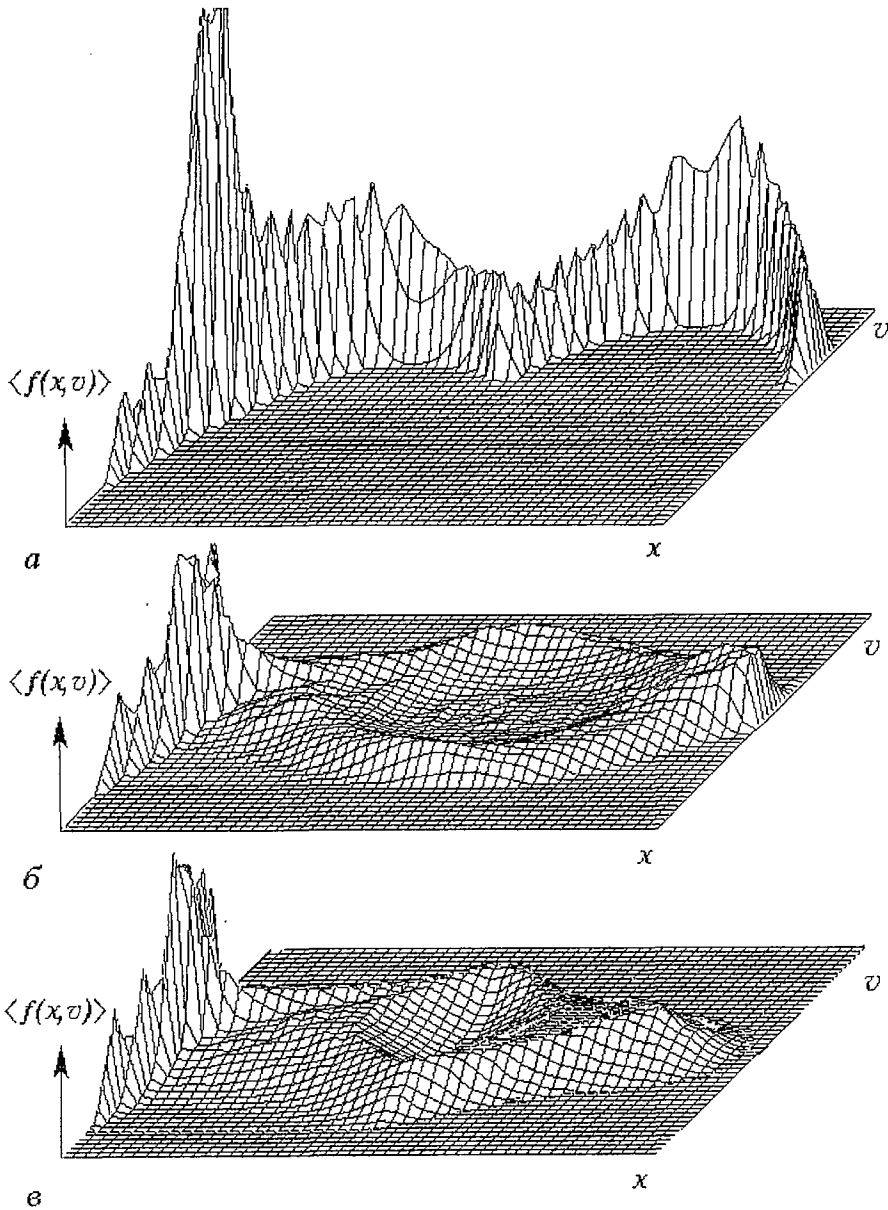


Рис. 5. Усредненная функция распределения для различных динамических режимов при $\alpha/\pi=1.2$ и следующих значениях φ_0 : а – 0.1; б – 0.5; в – 0.9

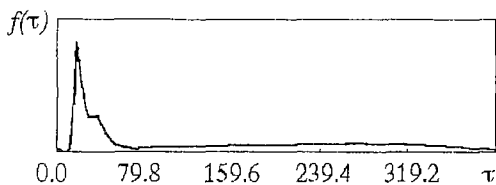


Рис. 6. Функция распределения числа крупных частиц в сечении за первым ВК по временам жизни в пространстве взаимодействия

$$T \approx 2l_2 / (2e\phi_0 v_0^{-1})^{1/2}. \quad (4)$$

На функции распределения это движение отражается в виде больших значений $\langle f(x, v) \rangle$ в кольцевой области, охватывающей точку $x=l_1, v=0$. Вихрь формируется почти при любых начальных условиях и, следовательно, представляет собой автоструктуру. Вихрь и ВК взаимодействуют через

поток частиц, выходящих из области вихря в область ВК.

Рассматривая усредненную функцию распределения для режима 3 при $\alpha/\pi=1.2$ и $\phi_0=0.9$ можно заметить (рис. 5, в), что, по-прежнему, наиболее вероятно движение частиц в области ВК или в области вихря. Основные отличия в функции распределения от режима 2 следующие. Во-первых, ширина кольцевой области, соответствующей вихрю, значительно больше. Это связано с тем, что в режиме 3 вихрь перемещается как целое из первой секции во вторую и обратно, когда между ВК и средней сеткой накапливается достаточный пространственный заряд. Во-вторых, значение $\langle f(x, v) \rangle$ существенно больше в области $x > x_{\text{ВК}}$ и $v < 0$, то есть в области, занятой частицами, прошедшими ВК и совершившими колебание вокруг средней сетки. Следовательно, и в области значений управляющих параметров, соответствующих режиму 3, устанавливается связь между ВК и вихрем.

Частицы, отраженные от второго ВК и возвратившиеся в область первого ВК, обеспечивают распределенную обратную связь в потоке. Механизм обратной связи следующий. Каждое колебание первого ВК создает сгусток электронов, распространяющийся далее по системе. Этот сгусток ускоряется в первой диодной секции и тормозится во второй. Пространственный заряд сгустка оказывает воздействие на форму потенциальной ямы между виртуальными катодами, изменяя высоту потенциального барьера во втором ВК. Частицы, распространяющиеся от второго ВК к первому, движутся в изменившейся потенциальной яме и, попадая в область первого ВК, оказывают воздействие на высоту потенциального барьера в нем.

Для количественной оценки степени связи между структурами была рассчитана функция распределения $f(\tau)$ частиц по временам жизни в сечении потока с координатой $x=1.1(x_{\text{ВК}})$. Типичный вид этой зависимости показан на рис. 6. Два пика соответствуют частицам, пролетающим данное сечение от первого ВК

к средней сетке при уменьшении высоты потенциального барьера. Длинный хвост функции распределения создан частицами, вернувшимися в это сечение после прохождения через вторую структуру. Величина

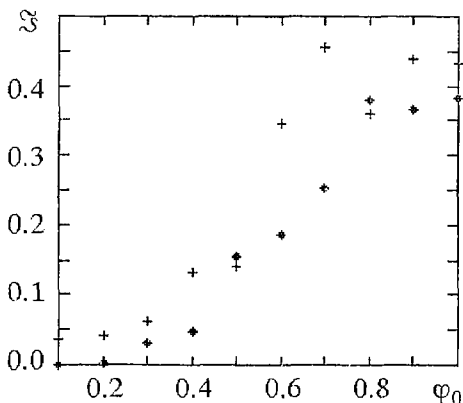


Рис. 7. Зависимость количества крупных частиц, перешедших из области вихря в область ВК от потенциала выходной сетки; ◆ - $\alpha/\pi=1.2$; + - $\alpha/\pi=1.6$

$$Z = \int_{\tau_1}^{\infty} f(s) ds, \quad (5)$$

где $\tau_1 > 4x_{\text{ВК}}/v_0$, может рассматриваться как количественная характеристика связи между структурами.

На рис. 7 показана зависимость величины Z от ϕ_0 для различных значений α/π . Можно видеть, что в режиме 1 колебаний ВК вторая структура не сформирована и величина Z близка к нулю. В режиме 2 значение Z

мало, то есть связь между структурами слабая, а затем с ростом φ_0 связь между вихрем и первым ВК усиливается. При большем токе пучка связь между структурами сильнее. Сравнивая с рис. 4, можно заключить, что с ростом связи между структурами при фиксированном токе пучка сложность колебаний увеличивается.

2. Внутренняя обратная связь через взаимодействие с обратной электромагнитной волной. Связанная система виркатор – лампа обратной волны

2.1. Модель. Как уже говорилось, для генератора на ВК является характерной сложная нерегулярная динамика электронного потока. Лампа обратной волны также в широком диапазоне параметров может демонстрировать хаотические автоколебания (см., например, [12–17]). Поэтому в связанной системе виркатор – лампа обратной волны [4] естественно ожидать появления хаотических режимов.

Мы рассматриваем следующую модель системы виркатор – лампа обратной волны. Секция с ВК представляет собой диод, в который инжектируется пучок со сверхкритическим током. Формирующийся ВК, колеблясь, глубоко модулирует пролетный ток, поступающий в область пространства взаимодействия, в которую введена периодическая замедляющая структура. Хорошо известно, что предварительная модуляция электронного потока оказывает сильное влияние на режимы генерации лампы обратной волны [18,19]. Максимум амплитуды поля обратной электромагнитной волны создается на входе замедляющей системы, то есть в области формирования ВК. Поле обратной волны, модулируя электронный поток в первой секции, в свою очередь оказывает воздействие на динамику ВК [20–22].

Основными параметрами, от которых зависит поведение исследуемой системы, являются первеанс пучка, который при неизменности L и v_0 пропорционален инжектируемому току,

$$\alpha = \omega_p L / v_0$$

и коэффициент связи электронного пучка с замедляющей системой

$$\xi = \omega^2 v_{гр} R_{св} \epsilon_0 / v_0^2.$$

Здесь ω – частота синхронизма между обратной волной и пучком; $v_{гр}$ и $R_{св}$ – соответственно групповая скорость и сопротивление связи обратной волны на частоте ω .

Численное исследование процессов в системе осуществлялось с помощью РС–моделирования (см. п. 1.1). Поле обратной электромагнитной волны в секции с замедляющей структурой искалось на основе нестационарной теории возбуждения волновода [19]. Представим поле обратной волны E в виде

$$E(x,t) = \text{Re}[\hat{E} \exp(i(\omega t - \beta x))],$$

где \hat{E} – медленно меняющаяся амплитуда, $\beta = \omega / v_\phi$, v_ϕ – фазовая скорость волны на частоте ω . Уравнение возбуждения записывается в виде

$$\partial \hat{E}(x,t) / \partial t - v_{гр} \partial \hat{E}(x,t) / \partial x = -v_{гр} \beta^2 R_{св} \hat{I}. \quad (6)$$

Здесь \hat{I} – амплитуда первой гармоники тока.

Уравнение (6) в безразмерных координатах можно переписать в следующем виде:

$$\partial \hat{E}(x,t)/\partial t - v_{rp} \partial \hat{E}(x,t)/\partial x = -\alpha \xi \hat{I}. \quad (7)$$

Здесь поле нормировано на величину $mv_0^2/(eL)$; скорости – на невозмущенную скорость потока v_0 ; время – на L/v_0 ; ток – на $\rho_0 v_0 S_{\perp}$. Комплексные величины \hat{E} и \hat{I} могут быть представлены через вещественные следующим образом. Введем

$$\begin{cases} I^{[\cos]} = 1/2\pi \int_0^{2\pi} j(x) \cos(\omega(t-x)) d(\omega t), \\ I^{[\sin]} = 1/2\pi \int_0^{2\pi} j(x) \sin(\omega(t-x)) d(\omega t), \end{cases}$$

$$E = -\hat{E}^{[\sin]} \sin(\omega(t-x)) + \hat{E}^{[\cos]} \cos(\omega(t-x)).$$

Здесь $j(x)$ – текущая плотность тока электронного потока, определяемая с помощью РИС-метода. Тогда уравнение (7) в комплексных величинах переписется в виде двух уравнений относительно действительных переменных

$$\begin{cases} \frac{\partial E^{[\sin]}}{\partial t} - v_{rp} \frac{\partial E^{[\sin]}}{\partial x} = -\alpha \xi I^{[\sin]}, \\ \frac{\partial E^{[\cos]}}{\partial t} - v_{rp} \frac{\partial E^{[\cos]}}{\partial x} = -\alpha \xi I^{[\cos]}. \end{cases} \quad (8)$$

Поле пространственного заряда E_q в этой области находилось с помощью следующего выражения

$$E_q(x) = 1/(2\pi\epsilon_0 r_b^2) \int \rho(x') \exp[-2(x-x')/r_b] \text{sign}(x-x') dx', \quad (9)$$

которое является аппроксимацией функции Грина заряженной частицы [23]. Здесь предполагается, что поток полностью заполняет волноведущую систему; r_b – радиус волновода.

Движение частиц, как и в предыдущем случае, определялось из уравнений движения (1)–(2), однако суммарное поле, действующее на частицу (см. уравнение (2)), определяется в данном случае как

$$E_{\Sigma} = E + E_q. \quad (10)$$

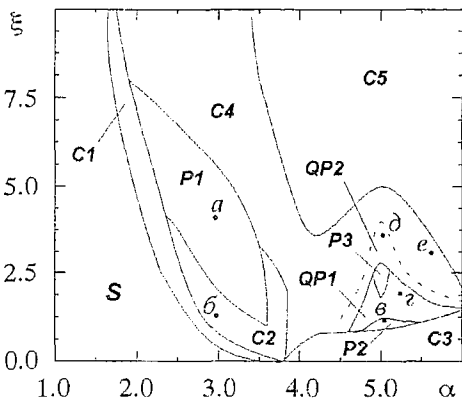


Рис. 8. Карта режимов на плоскости параметр тока пучка α – коэффициент связи пучка с замедляющей структурой ξ

Уравнения (8) интегрировались методом разностей против потока [24]. Особенностью интегрирования уравнений движения совместно с уравнениями (8) является то, что уравнения возбуждения решаются на другой пространственно-временной сетке с шагами по времени и координате соответственно $\Delta T = 2\pi/\omega$ и $\Delta X = v_{\phi} \Delta T$. Уравнения движения интегрируются методом с перешагиванием [25] с шагом $\Delta t \ll \Delta T$. В течение времени ΔT величины $E^{[\sin]}$, $E^{[\cos]}$ считаются постоянными.

2.2. Динамика системы. На рис. 8 приведено примерное разбиение плоскости параметров (α, ξ) на области с

различными режимами колебаний электрического поля из области ВК. Характеристики поведения системы для точек a, \dots, e показаны на рис. 9, $a-e$: фазовый портрет, спектр мощности колебаний электрического поля в области ВК и электромагнитного сигнала на входе лампы обратной волны.

В области S виркатор не возбужден, так как инжектируемый ток меньше критического. Однако, увеличение коэффициента связи ξ приводит к возбуждению лампы обратной волны, выходной сигнал которой, модулируя электронный поток в виркаторе, способствует развитию неустойчивости, а следовательно, и формированию ВК в потоке.

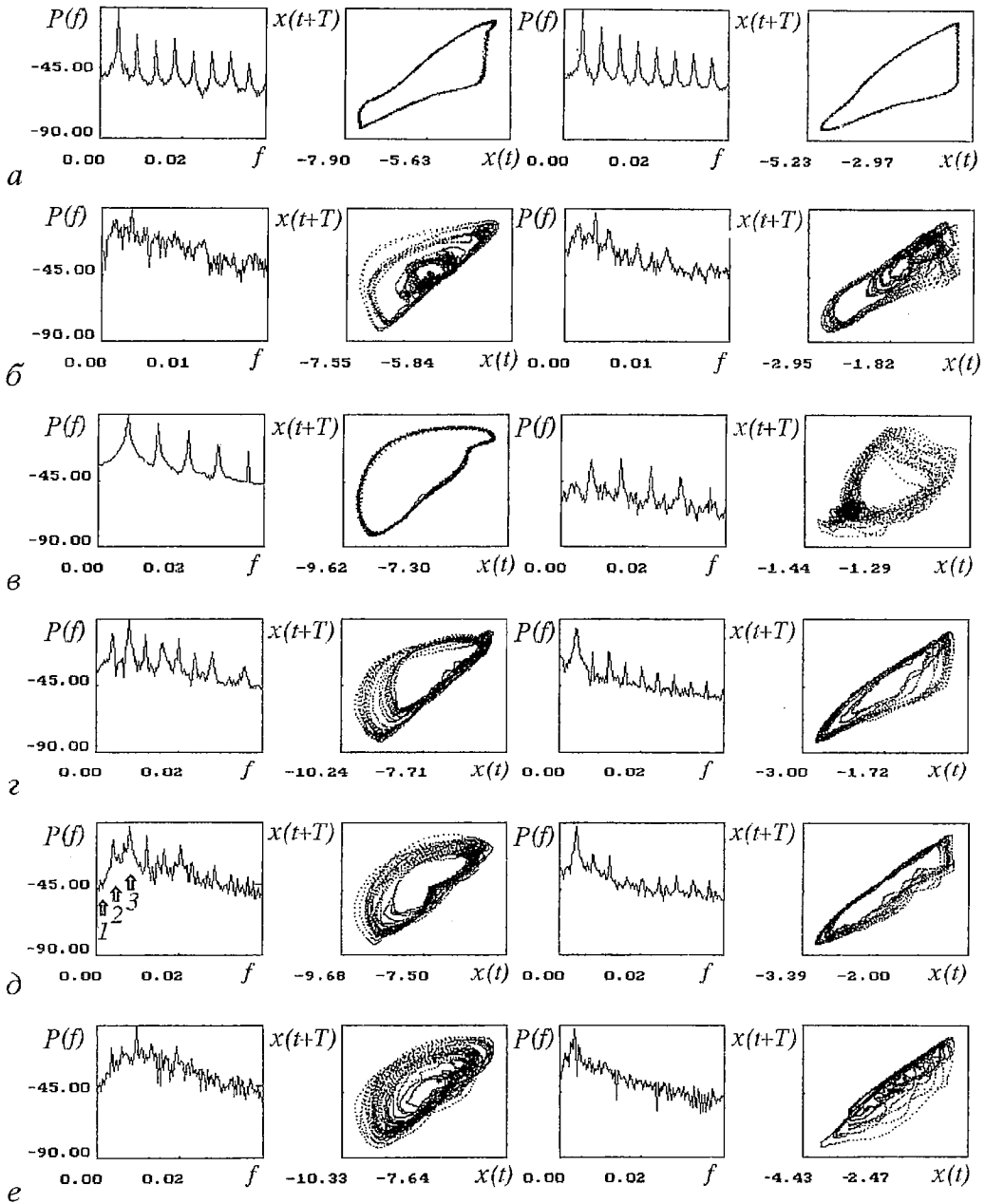


Рис. 9. Спектры мощности, фазовые портреты колебаний электрического поля в области ВК (два левых столбца) и на входе лампы обратной волны (два правых столбца); $(a)-e$ соответствуют точкам a, \dots, e на рис. 8

Переход от устойчивых состояний в виркаторе к периодическим движениям в области $P1$ (см. рис. 9, *a*) осуществлялся через две области $C1$ и $C2$ хаотических колебаний. Режим $C1$ характеризуется колебаниями, у которых стадии регулярных движений хаотически сменяются срывами колебаний. При $\alpha \approx 3.5$ увеличение ξ приводит к возникновению другого хаотического режима $C2$, образом которого служит странный аттрактор «петлеобразной» структуры (см. рис. 9, *б*). Движение на аттракторе можно разделить на два этапа: равномерное вращение по траектории, соответствующей предельному циклу в области регулярных движений, и сильно неравномерное по скорости сложное движение фазовой траектории в окрестности внутренней петли, вследствие чего появляются сбои в фазе колебательного процесса. Автокорреляционная функция колебательным образом спадает к нулю.

Увеличение параметра тока пучка α приводит к появлению хаотических режимов $C3$ при малых ξ , $C4$ и $C5$ при больших ξ , а также при значениях $\alpha \sim 5$ регулярных и квазипериодических движений. При $\xi \sim 1$ наблюдается узкая область $P2$ регулярных движений в виркаторе (см. рис. 9, *в*) с частотой $f_0 \approx 1.4\omega_p/\pi$. При этом лампа обратной волны работает в регенеративном режиме и обеспечивает запаздывающую обратную связь. Режим $QP1$ (см. рис. 9, *г*) представляет собой квазипериодические колебания с двумя несоизмеримыми частотами: f_0 и частотой генерации лампы обратной волны. Область $P3$ соответствует возникновению резонансного цикла на торе с числом вращений $1 : 2$. На рис. 9, *д* представлены характеристики колебаний, соответствующие области $QP2$ на карте режимов. В спектре выделяются три базовых частоты (отмечены цифрами на рисунке). Остальные спектральные компоненты являются линейными комбинациями этих частот. Здесь частоты 2 и 3 соответствуют частоте колебаний ВК и генерации ЛОВ, как и в режиме $QP1$. Физические процессы, приводящие к появлению частоты 1, обсуждаются в п. 2.3. В фазовом пространстве этому режиму соответствует тор-3. Дальнейший рост ξ приводит к возникновению нового хаотического режима $C4$. Аттрактор достаточно однороден (см. рис. 9, *е*), однако грубая структура предельного множества периодических и квазипериодических движений сохраняется. Автокорреляционная функция имеет вид близкий к δ -функции.

Анализ размерности аттракторов позволил выделить на карте режимов область $C5$. Если для хаотических режимов $C1-C4$ корреляционный интеграл испытывает насыщение с увеличением размерности пространства вложения, как это видно из рис. 10, *а*, на котором представлены зависимости наклона корреляционного интеграла [26] от масштаба наблюдения для различных значений размерности пространства вложения m , то в области $C5$ размерность перестает насыщаться (рис. 10, *б*), что свидетельствует о большом числе n возбуждаемых степеней свободы в системе. Длительность временных реализаций позволила оценить число степеней свободы как $n \geq 6$.

Для сравнения различных режимов колебаний определялась средняя в области скейлинга корреляционного интеграла размерность аттракторов в зависимости от управляющих параметров α и ξ . Значение размерности для двух значений α в зависимости от ξ приведены в таблице. Из нее видно, что динамика системы в области $\alpha \sim 2 \div 4$ характеризуется небольшими значениями размерности ($D \leq 2.5$). Продвижение в область больших α приводит к сильнонерегулярным режимам с размерностью аттракторов больше 3 (за исключением достаточно узкой области синхронизации колебаний при $\xi \sim 1 \div 2.5$).

* Данный режим можно классифицировать как автономные колебания ВК.

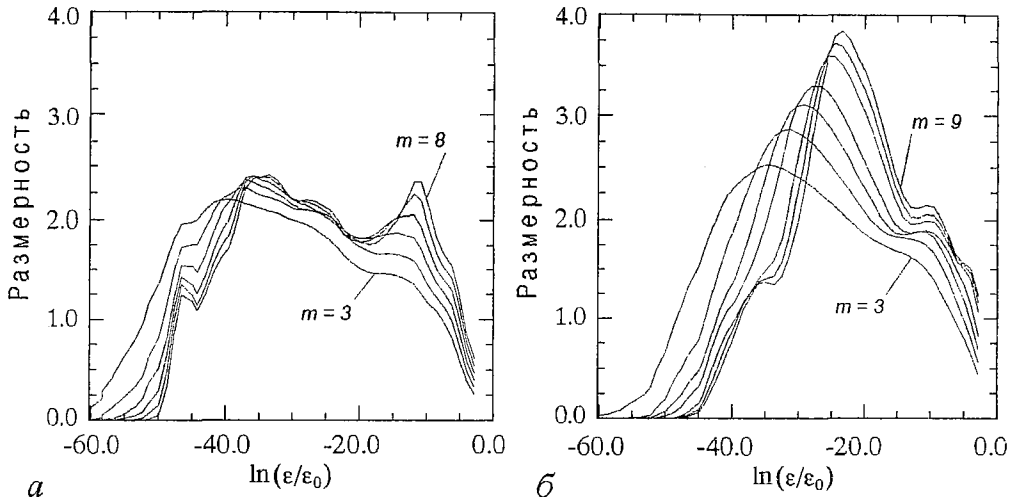


Рис. 10. Зависимости размерности аттрактора от масштаба наблюдения для различных значений размерности пространства вложения m для режимов C2 (а) и C5 (б)

Таблица

Размерность реконструированных аттракторов для различных значений параметров α и ξ

Безразмерный ток α	Коэффициент связи ξ							
	0.0	0.5	1.0	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0
3.3	1.03	1.06	2.21	1.02	1.06	1.17	1.35	14.0
5.0	3.24	3.12	1.07	1.12	1.10	3.30	3.73	3.90

2.3. Физические процессы. Рассмотрение динамики потока с помощью пространственно–временных диаграмм (рис. 11) позволило выделить физические процессы, сопровождающие хаотическую динамику. При небольшой надкритичности $\alpha < 4.5$ возникновение сложного поведения связывается с процессами кинематической неустойчивости электронного потока, модулируемого полем обратной волны. Как видно из рис. 11, а, в потоке образуются два сгустка на каждом периоде колебаний – сгусток отраженных от ВК электронов и вторичный сгусток в пролетном потоке (обозначены стрелкой). Вторичная структура формируется в результате кинематической неустойчивости электронного потока. От нее отражается часть электронного потока, что оказывает влияние на условия формирования ВК на каждом последующем периоде колебаний (аналогичный механизм описан в [27]).

При большой надкритичности $\alpha \geq 5$ ответственным за хаотическую динамику является сгусток метастабильных электронов, обозначенный стрелкой на рис. 11, б. Он существует в течение более чем одного периода колебаний и осуществляет дополнительную внутреннюю обратную связь, воздействуя на условия формирования ВК на последующих периодах колебаний после своего образования. Отвод даже небольшой части электронов из этой структуры и, следовательно, уменьшение заряда метастабильного сгустка, позволяет перевести систему в регулярный P2 или квазипериодический QP2 режимы. Последний связан с динамикой метастабильного сгустка, живущего в пространстве взаимодействия в течение 7÷8 периодов колебаний ВК (частота, отмеченная цифрой 1 в спектре на рис. 9, д, определяется именно этой структурой).

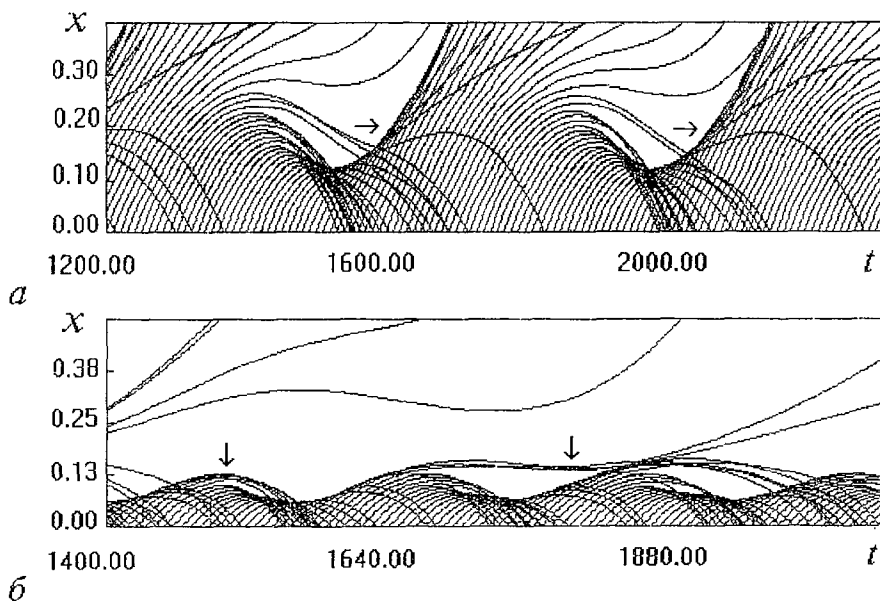


Рис. 11. Пространственно–временные диаграммы электронного потока для хаотических режимов при $\alpha < 4$ (а) и $\alpha > 5$, $\xi > 4$ (б)

Заключение

Проведенный анализ показывает возможность использования внутренней распределенной обратной связи для управления сложной динамикой прибора с ВК. Такие системы в определенных пределах могут конкурировать с системами с внешней обратной связью. Это обуславливается простотой конструкции – отсутствием внешних элементов связи с механической пререстройкой ее параметров.

Возможность управления динамикой виркаторной системы за счет изменения параметров внутренней обратной связи тесно связано с влиянием ее на процессы структурообразования в электронном потоке с ВК. В первой модели (двухсекционный виркатор с пониженным потенциалом коллектора) имеет место обратная связь по потоку через формирующуюся «вихревую» автоструктуру (влияние общего поля пространственного заряда уменьшено за счет введения средней сетки между секциями с ВК). Увеличение связи между структурами за счет роста пространственного заряда вихря при увеличении потенциала отражателя позволяет повысить сложность колебаний в области первого ВК. Во второй модели (виркатор – лампа обратной волны) обратная связь осуществлялась через поле, которое вводится из замедляющей системы в область формирования ВК (при этом отражения в пролетном потоке отсутствуют). Механизм возникновения хаотической динамики в этом случае связывается с формированием вторичных по отношению к ВК структур в потоке. Причем их роль возрастает с ростом коэффициента связи пучка с замедляющей системой и током пучка. Однако, при определенных условиях (примерное равенство частоты генерации лампы обратной волны характерной частоте колебаний ВК или ее субгармонике) удастся подавить образование вторичных электронных структур в потоке, и, как следствие этого, улучшить спектральные характеристики генерации ВК.

Отметим, что рассмотренный подход введения в систему на ВК внутренней обратной связи допускает дальнейшее развитие. К таким приборам могут быть отнесены виркаторы, в которых используются добротные резонансные системы либо в области формирования ВК [28], либо в области ускорения РЭП [29]. Кроме того, к системам, реализующим комбинированные типы обратной связи, можно

причислить связанные виркаторы виртодного типа [30]. Изменение параметров потока одного из модулей позволяет в этом случае эффективно влиять на динамику связанного с ним генератора [31].

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96-02-16753) и Госкомвуза РФ (проект 2-33).

Библиографический список

1. *Birdsall C.K., Bridges W.B.* Electron dynamics of diode regions. N.-Y.: Academic Press, 1966.
2. *Селемир В.Д., Алехин 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. Т.20, №7,8. С.689.
3. *Thode L.E.* // *High Power Microwave Sources* / Eds. V.L. Granatstein and I. Alexeff. Boston: Artech House, 1987, Chap.14.
4. *Гадецкий Н.П., 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. С.530.
5. *Кислов В.Я., Мясин Е.А., Залогин Н.Н.* О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью // *РЭ*. 1979. Т.25. 1980. С. 2160.
6. *Кузнецов С.П.* Сложная динамика генератора с запаздывающей обратной связью // *Изв.вузов. Радиофизика*. 1982. Т.25. С. 1410.
7. *Анфиногентов В.Г.* Хаотические колебания и образование структур в СВЧ устройствах с ВК // *Актуальные проблемы электронного приборостроения*. Тез. докл., 10–12 сентября 1996. Саратов, 1996. Ч.1. С.63.
8. *Григорьев В.П., Жерлицин А.Г., Коваль Т.В.* // *Физика плазмы*. 1990. Т.16. С. 1353.
9. *Manneville P., Pomeau Y.* Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems // *Physica 1D*. 1980. P.219.
10. *Wolf A., Swift J.B., Swinney H.L. and Vastano J.A.* Determining Lyapunov exponents from a time series // *Physica D*. 1985. Vol. 16. P.285.
11. *Grassberger P., Procaccia J.* Characterization of strange attractors // *Phys. Rev. Lett.* 1983. Vol. 50, № 5. P. 364.
12. *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальные и теоретические исследования стохастических автоколебаний в лампе обратной волны // *Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Материалы 5-й зимней школы-семинара инженеров*. Саратов: Изд-во Саратов.ун-та, 1980. С.25.
13. *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П., Федосеева Т.Н.* Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ // *Изв.вузов. Радиофизика*. 1978. Т. 21, № 7. С. 1037.
14. *Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Стохастические колебания в системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна // *Нелинейные волны. Стохастичность и турбулентность*. Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1980. С.29.
15. *Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П.* Периодические и стохастические модуляционные режимы в электронных генераторах с распределенным взаимодействием // *Релятивистская высокочастотная электроника*. М.: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. С.101.
16. *Пегель И.В.* Моделирование нестационарных процессов в релятивистской лампе обратной волны методом макрочастиц // *Изв.вузов. Физика*. 1996. № 12. С.62.

17. Рыскин Н.М., Титов В.И., Трубецков Д.И. О сценарии перехода к хаосу в однопараметрической модели лампы обратной волны // Материалы науч. конф. «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ», 4–8 сентября 1997. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1997. С.40.
18. Вакс В.Л., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С. и др. // РЭ. 1994. Т.39. С.957
19. Электроника ламп обратной волны / Под ред. В.Н. Шевчика и Д.И. Трубецкова. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975.
20. Григорьев В.П., Жерлицын А.Г., Коваль Т.В., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. О возможности изменения частоты излучения внешним сигналом в СВЧ-триоде с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. 1988. Т.14. С. 2164.
21. Woo W., Benford J., Fittinghoff D., Harteneck B., Price D., Smith R. and Sze H. Phase locking of high-power microwave oscillators // J.Appl.Phys. Vol. 65, № 2, P. 861.
22. Hramov A.E. Influence of external action on chaotic dynamics of virtual cathode oscillations // Proc. 5th Int.Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics in Electronic Systems, Moscow, Russia, 26–27 June, 1997. P.443.
23. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.:Наука, 1990.
24. Роч П. Вычислительная гидродинамика, М: Мир, 1980.
25. Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma Physics via Computer Simulation. Bristol: Adam Hilger, 1991.
26. Андрушкевич А.В., Кипчатов А.А., Красичков Л.В. Диагностика сложных колебаний по корреляционной размерности // Международный семинар. Нелинейные цепи и системы. 16–18 июня, 1992. Москва, 1992. Т.2. С.308.
27. Анфиногентов В.Г. Хаотические колебания в электронном потоке с виртуальным катодом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т.2, № 5. С.69.
28. Benford J., Price D., Sze H., Bromley D. Interaction of a resonant microwave generator with an enclosing resonant cavity // J.Appl.Phys. 1987. Vol. 61. P. 2098.
29. Jiang W., Masugata K., Yatsui K. High-power microwave oscillator: vircator-klystron // Proc. of 11th International Conference on High Power Particle Beams. BEAMS'96. Prague. 10–14 June, 1996. P–1–29.
30. Magda I.I., Prokopenko Yu.I. Co-operative high-power radiation of two beams at the dual vircator complex // Proc. of 11th International Conference on High Power Particle Beams. BEAMS'96. Prague. 10–14 June, 1996. P–1–59.
31. Храмов А.Е. Колебания в системе двух связанных генераторов на виртуальном катоде виртодного типа с управляемой связью: вычислительный эксперимент // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6, № 1. С. 108.

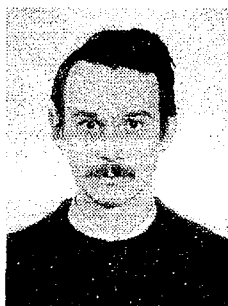
Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 24.12. 97

INFLUENCE OF DISTRIBUTED FEEDBACK ON CHAOTIC VIRTUAL CATHODE OSCILLATION

V.G. Anfinogentov, A.E. Hramov

Complex dynamics of electron beam with virtual cathode and distributed feedback is considered with the aid of numerical simulation. Characteristics of virtual cathode complex dynamics is investigated. For the system with connection through electron beam formation of the different types of autostructures is considered. It is proved, that complications of virtual cathode oscillation are connected with an increase of interaction between structures. For the system with connection through electromagnetic fields (vircator – BWO) structures formation processes are investigated. It is demonstrated, that second structure suppression by the interaction of virtual cathode with backwave fields makes possible controlling of output radiation characteristics.



Анфиногентов Василий Геннадиевич – родился в 1968 году в Саратове, окончил Саратовский государственный университет (1991). После окончания университета работает на кафедре электроники и волновых процессов СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1997) по специальности радиофизика. Область научных интересов – сложная динамика в распределенных системах электронной природы, мощная СВЧ электроника.



Научная конференция

**МОЛОДЕЖЬ И НАУКА НА ПОРОГЕ ХХІ ВЕКА
МиН-ХХІ**

Саратов, Россия, 4–5 апреля 1998

Работа конференции будет проходить по десяти специализированным секциям, представляющим широкий спектр гуманитарных и естественных научных направлений. Из 250 полученных Оргкомитетом тезисов докладов в программу конференции включено около 200, прошедших экспертную оценку научным комитетом конференции.

Программа конференции будет выслана всем участникам до 20 марта 1998 года.

Председатель научного комитета конференции
Заслуженный деятель науки РФ, профессор Вадим Семенович Анищенко

Секретарь конференции
Стрелкова Галина Ивановна, СГУ, III кор., ком. 35
Тел.: (8452) 514549; e-mail: galya@chaos.ssu.runnet.ru

