



НЕАВТОНОМНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ В ПЛОСКОМ ДИОДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов

В работе исследуется влияние внешнего воздействия на колебания электронного потока с виртуальным катодом в плоском диоде. Представлены результаты численного эксперимента на модели с модуляцией электронного потока, поступающего в пространство дрейфа, и модели с электромагнитным сигналом, воздействующим непосредственно на колебания виртуального катода в пространстве взаимодействия. Показано, что в неавтономном режиме исследуемая система демонстрирует различные нелинейные колебания, включая детерминированный хаос и синхронизацию колебаний виртуального катода внешним воздействием. Рассмотрение особенности обоих типов внешнего воздействия обнаружило, что модуляция потока является более эффективным и гибким методом управления колебаниями виртуального катода. Исследование физических процессов в системе показало, что сложная динамика в системе появляется в результате взаимодействия большого числа структур в потоке, а режимы синхронизации связаны с подавлением их роста. Полученные в численном эксперименте фазовые соотношения между сигналом, генерируемым колебаниями виртуального катода, и внешним сигналом согласуются с результатами физического эксперимента.

Введение

Приборы, использующие неизлучательные пучковые неустойчивости [1,2] для генерации СВЧ излучения высокой мощности, виркаторы [3], являются одними из наиболее активно изучаемых в последнее время. В них колебания виртуального катода – области в пространстве взаимодействия с потенциалом, близким к потенциалу катода – используются для фазовой селекции электронного потока. Широко известными преимуществами приборов на виртуальном катоде являются высокая выходная мощность, простота конструкции, возможность работы без ведущего магнитного поля. Вместе с тем, в связи с перспективами использования виркаторов в задачах энергетики, связи и обороны встает вопрос о возможности эффективного управления такими характеристиками подобных приборов, как частота и ширина полосы генерации СВЧ колебаний.

Один из перспективных путей решения проблемы управления динамикой подобных приборов – введение в систему управляемой обратной связи [4–7]. Другой путь – разработка виркаторов с синхронизацией по фазе и частоте от внешнего источника [8–12]. Такой подход ведет в перспективе к созданию фазированных антенных решеток на нескольких параллельно работающих

виркаторах [13,14]. При этом внешний сигнал может воздействовать либо непосредственно на колебания виртуального катода в пространстве взаимодействия [8–11,14,15], либо на формирование релятивистского электронного пучка [12,13,16–18]. В последнем случае управляющий сигнал может быть существенно меньше, что важно для практической реализации этого метода управления.

Кроме того, интерес к проблеме влияния внешнего воздействия на колебания виртуального катода определяется предложенными в последнее время комбинированными системами с виртуальным катодом, например, виркатор–клистрон [19] или связанная система виртод – лампа обратной волны [4,7,20]. При этом опять можно выделить указанные выше два типа внешнего воздействия: модуляция электронного пучка в системах с высокочастотной резонансной системой в области ускорения потока (виркатор–клистрон) и воздействие сигнала из цепи обратной связи непосредственно на виртуальный катод (системы типа виртод – ЛОВ).

Вопросу влияния внешнего воздействия на колебания виртуального катода посвящено сравнительно большое число экспериментальных работ [8–11,14,15,17,21]. Однако, практически нет работ, посвященных математическому моделированию каких–либо простейших распределенных моделей, описывающих неавтономные колебания электронного потока с виртуальным катодом, хотя именно анализ простых моделей позволяет детально изучить механизм синхронизации в такой системе.

В данной работе приводятся результаты численного исследования неавтономных колебаний виртуального катода в простейшей модельной системе – плоском диоде со сверхкритическим током для различных типов внешнего воздействия.

Обсуждение исследуемой модели

Рассмотрим простую электростатическую диодную модель (рис. 1). Электронный поток без нейтрализации ионным фоном распространяется между двумя плоскостями. Исследуем два типа внешнего воздействия. В первом случае внешний электромагнитный сигнал воздействует на формирование электронного потока, что приводит к кинематической модуляции потока на левой границе системы (в плоскости инжекции). Во втором случае внешний сигнал воздействует на электронный поток в пространстве взаимодействия.

Заметим, что такая система является важной и в теоретическом смысле, так как она представляет собой простейшую модель микроволнового генератора в неавтономном режиме. Хорошо известно, что электронный поток с виртуальным катодом в диоде без внешнего воздействия обладает сложной нерегулярной динамикой (см., например, [22–28]). Нас интересует влияние внешнего воздействия на хаотическую динамику электронного потока с виртуальным катодом в нашей модели.

Поведение электронного потока в диоде в автономном режиме определяется невозмущенным углом пролета по плазменной частоте ω_p

$$\alpha = (\eta |p_0| / \epsilon_0)^{1/2} L / v_0 = \omega_p L / v_0,$$

где η – удельный заряд электрона, p_0 и v_0 – соответственно невозмущенные скорость и плотность электронного потока, L – расстояние между плоскостями диода и ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

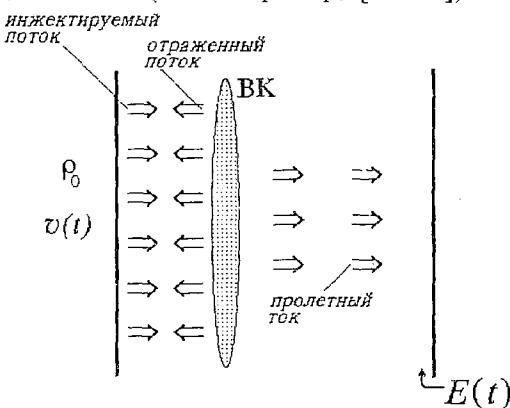


Рис. 1. Схема исследуемой системы

Неустойчивость, приводящая к формированию виртуального катода, появляется в системе для $\alpha > 4/3$ [27]. С увеличением α система демонстрирует периодические, квазипериодические и хаотические колебания [26]. Мы исследуем систему при фиксированном α , что соответствует хаосу с размерностью аттрактора в диапазоне значений $1.5 \div 2.0$.

Исследование нелинейных и нестационарных процессов в рассматриваемой системе осуществлялось с помощью PIC (*particle-in-cell*) моделирования [29] в электростатическом приближении.

Модель с модуляцией электронного потока, поступающего в пространство взаимодействия

Предположим, что на входе в пространство взаимодействия имеет место скоростная модуляция следующего вида:

$$v(x=0) = v_0(1 + m \sin \omega t),$$

а модуляция по плотности отсутствует

$$\rho(x=0) = \rho_0.$$

Здесь m – глубина модуляции, а ω – частота внешнего воздействия, приводящего к модуляции потока.

На рис. 2 приведено разбиение плоскости параметров (глубина модуляции – частота внешнего воздействия) на характерные режимы, построенное по результатам численного эксперимента. По горизонтальной оси отложена частота внешнего воздействия ω , нормированная на характерную частоту ω_0 колебаний виртуального катода в автономном режиме. По вертикальной оси отложена глубина модуляции потока в плоскости инжекции в процентах. Области с качественно отличающимися режимами поведения отмечены на карте режимов различными узорами «заливки»; белые области соответствуют регулярным движениям с базовой частотой, равной частоте внешнего воздействия ω . Они обозначены отношением двух чисел ($a:b$), где a – число витков траектории аттрактора, оставшихся в плоскости, а b – число витков, выходящих в пространство. Сумма этих двух чисел ($a+b$) равна полному числу витков траектории аттрактора в фазовом пространстве.

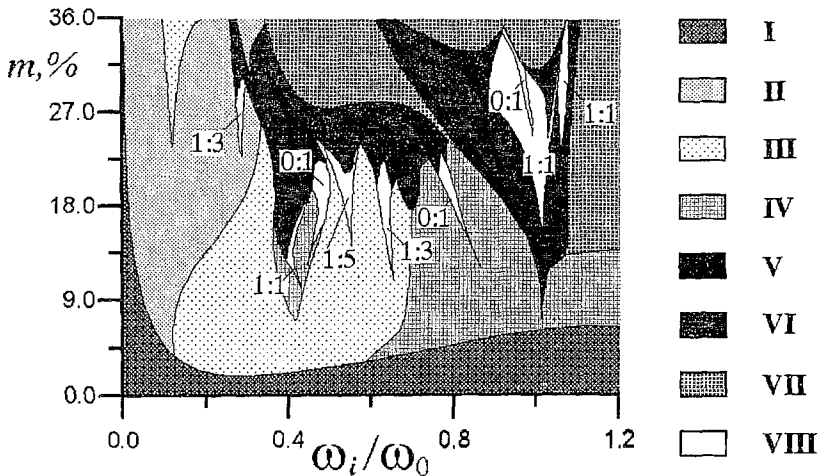


Рис. 2. Разбиение плоскости параметров (m , ω/ω_0) на области с различными режимами колебаний виртуального катода для модели с предварительной модуляцией потока

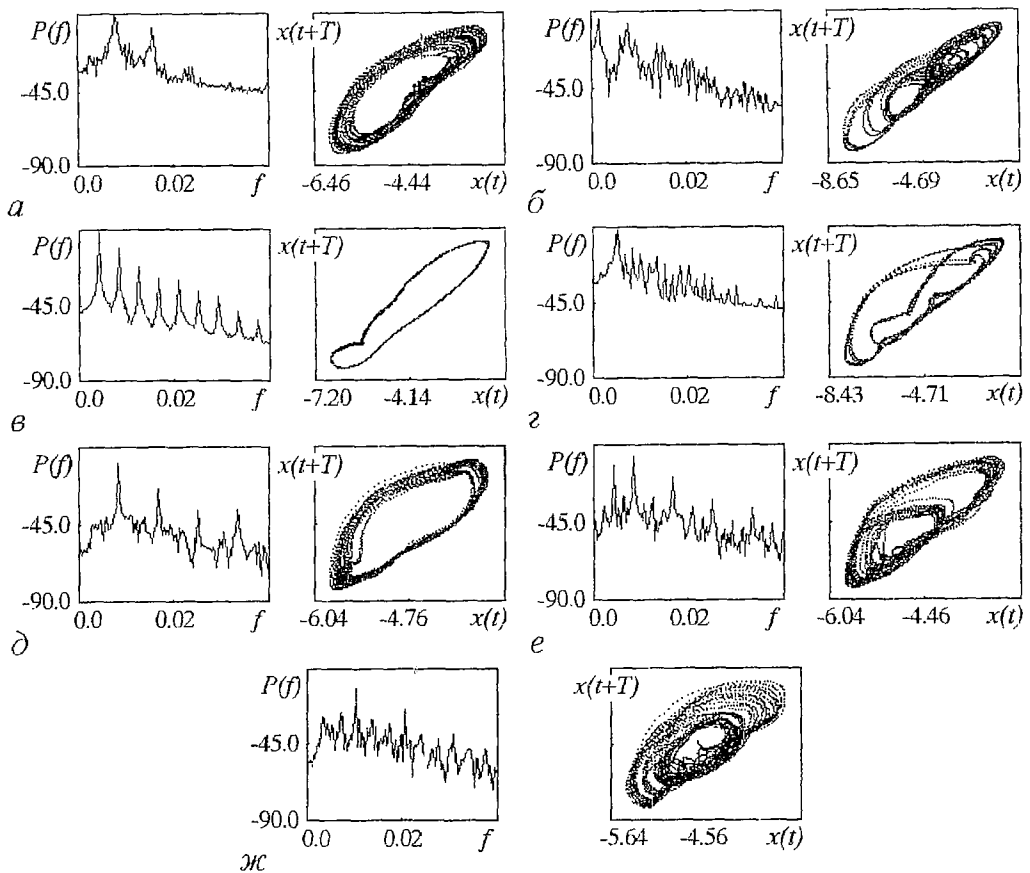


Рис. 3. Спектры мощности и фазовые портреты колебаний электрического поля в области виртуального катода для различных режимов поведения системы

На рис. 3 представлены спектры мощности в логарифмическом масштабе, проекции фазовых портретов, построенных по методу Такенса [30] по временным реализациям колебаний электрического поля в области виртуального катода для различных режимов поведения системы. Рис. 4 демонстрирует результаты расчета размерности восстановленных аттракторов [31] для характерных режимов, отмеченных на бифуркационной диаграмме. На нем приведены в двойной логарифмической шкале зависимости наклона D_C корреляционного интеграла [32]

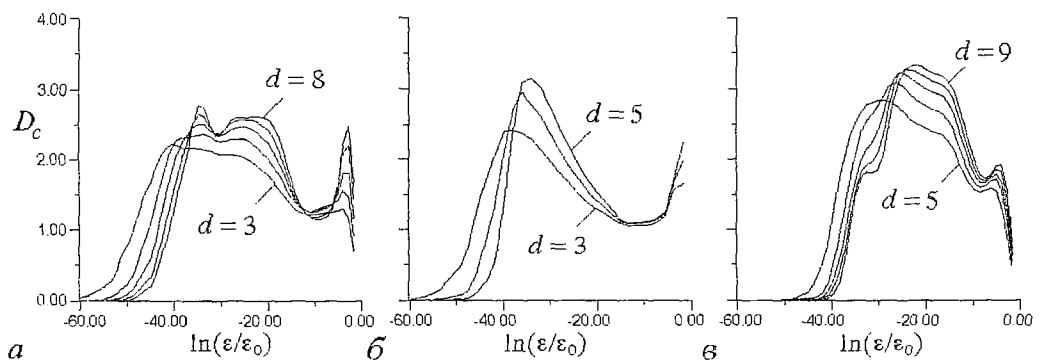


Рис. 4. Зависимости наклона корреляционного интеграла D_C от масштаба наблюдения ϵ для различных режимов поведения системы

от нормированного на характерный размер аттрактора ϵ_0 масштаба наблюдения ϵ для различных значений размерности пространства вложения d .

Рис. 3, а, 4, а соответствуют колебаниям системы в автономном и слабовозмущенном режиме (область I на карте режимов). В спектре выделяются пики с частотой ω_0 и ее гармониками $2\omega_0$ и $3\omega_0$. Зависимость наклона корреляционного интеграла от масштаба наблюдения свидетельствует о сложной неоднородной структуре ленточного аттрактора, соответствующего этому режиму. Об этом свидетельствует три характерных масштаба, четко выделяющихся на графике размерности (рис. 4, а).

Рост глубины модуляции m приводит к появлению режимов с двумя характерными частотами ω_0 и ω_1 . Обнаружены квазипериодические колебания (область II), что хорошо видно на спектре (рис. 3, б). Сечение Пуанкаре соответствующего этому режиму аттрактора (рис. 5, а), имеет характерный для подобных режимов вид замкнутой кривой. При $\omega_1/\omega_0 > 0.2$ наблюдается режим с двумя характерными частотами, которые возможно классифицировать как тор-хаос [33] (область III; сечение приведено на рис. 5, б; видно, что инвариантная кривая в сечении теряет гладкость) и хаотические колебания со сравнительно однородным аттрактором (область IV). Сечение Пуанкаре в этом случае (рис. 5, в) представляет собой однородное заполнение некоторой области в плоскости сечения точкими.

На фоне этих режимов с дальнейшим увеличением глубины модуляции при $\omega_1/\omega_0 \leq 1$ появляются сравнительно узкие области регулярных движений (синхронизации) колебаний виртуального катода на частоте внешнего воздействия. При этом режим синхронизации характеризуется циклами различного периода в фазовом пространстве (см., например, рис. 3, в, г).

Для значений частоты внешнего воздействия $\omega_1/\omega_0 \leq 0.8$ регулярные режимы возникают жестким образом, что свидетельствует о сложной многолистной структуре карты режимов.

Режимы синхронизации окружены широкими областями хаоса, в фазовом пространстве которому соответствуют ленточные аттракторы. Можно выделить области одноленточного (область V, рис. 3, д) и двухленточного (VI, рис. 3, е) аттрактора. В спектре на фоне шумового пьедестала присутствуют выбросы на частоте внешнего воздействия, ее гармоник и, для двухленточного хаоса, ее субгармоники. Размерность ленточных аттракторов, как видно из рис. 4, б, равна $1+\Delta$, где $\Delta \leq 0.2$.

Отметим, что в областях ленточных аттракторов, включая клывы регулярных движений, возможно управление исследуемой системой. Это иллюстрирует рис. 6, на котором построены зависимости характерной частоты генерации системы ω в зависимости от тока α для случая автономных колебаний (пунктирная линия; в качестве ω берется значение частоты колебаний в

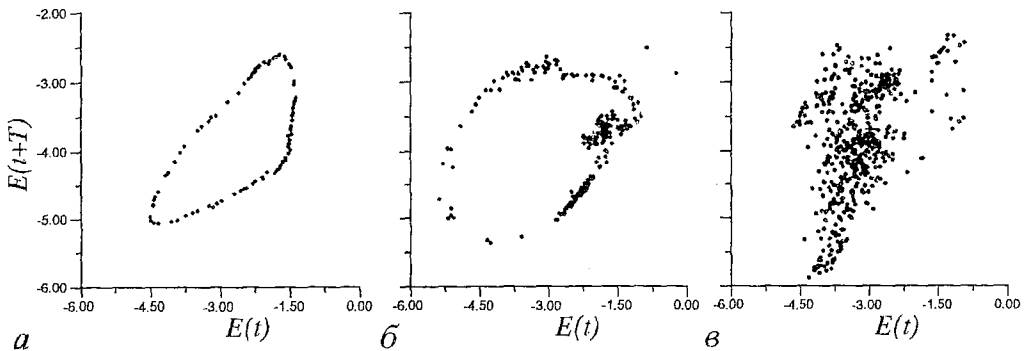


Рис. 5. Сечения Пуанкаре для режимов II (а); III (б); IV (в)

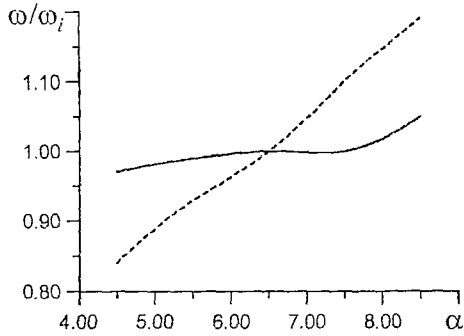


Рис. 6. Зависимость частоты колебаний виртуального катода от тока пучка

разброса скоростей потока. Вид зависимости на рис. 6, а также спектральный состав генерации в нашей модели согласуется с результатами моделирования виркатора-клистрона [18, с.ШЕ; 19], который в случае высокой добротности входного резонатора может быть сведен к рассматриваемой нами системе.

При больших m и при $\omega_i > \omega_0$ в системе наблюдаются колебания (область VII), предельное множество которых в фазовом пространстве имеет сложную структуру (рис. 3, ж). На проекции выделяется область быстрых движений (внутренняя петля аттрактора) и область медленных движений (внешняя лента). На временной реализации наблюдаются сбой фазы колебаний, в спектре мощности на фоне развитого шумового пьедестала присутствуют выбросы с базовой частотой ω_i . Кривые наклона корреляционного интеграла для этого случая приведены на рис. 4, в. Сравнивая эти кривые с предыдущими (см. рис.4,а,б), можно видеть, что с ростом глубины модуляции сложность динамики виртуального катода возрастает, в колебательное движение вовлекаются новые степени свободы

автономной системе при $\alpha \approx 2\pi$) и для случая модуляции электронного потока с $m \approx 20\%$ (сплошная линия). Видно, что с изменением тока пучка (а следовательно, и частоты невозмущенных колебаний виртуального катода, определяемых плазменной частотой потока [36,37]) частота генерации в неавтономном случае практически не меняется. Этот эффект может применяться для стабилизации характеристик генерации виркатора при помощи модуляции потока в случае нестабильности импульса ускоряющего напряжения или большого

($D_C > 3$ в отличие от других режимов, где $D_C < 3$). Однако, сравнительно небольшое значение размерности d пространства вложения достаточное для насыщения размерности свидетельствует о том, что сложные колебания возникают в результате взаимодействия небольшого числа мод.

Переходы от одного режима к другому осуществляются либо мягким образом, например, при переходе от квазипериодических колебаний к торхаосу, либо через перемежаемость [38]. В последнем случае наблюдается резкий скачок амплитуды колебаний при переходе от одного режима к другому. Характерная временная реализация для перемежаемости и гистограмма длительности ламинарных фаз приведены на рис. 7.

Физические процессы анализировались с помощью пространственно-временных диаграмм электронного потока в пространстве дрейфа (рис. 8). На них изображены траектории заряженных частиц в координатах: местоположение частицы – время. Рис. 8, а иллюстрирует движение частиц в случае хаотических

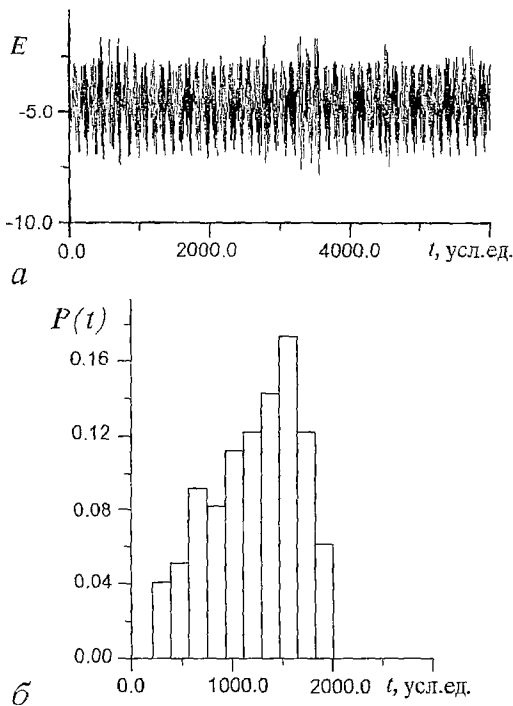


Рис. 7. Вид временной реализации (а) и гистограмма длительности ламинарных фаз (б) для режима перемежаемости

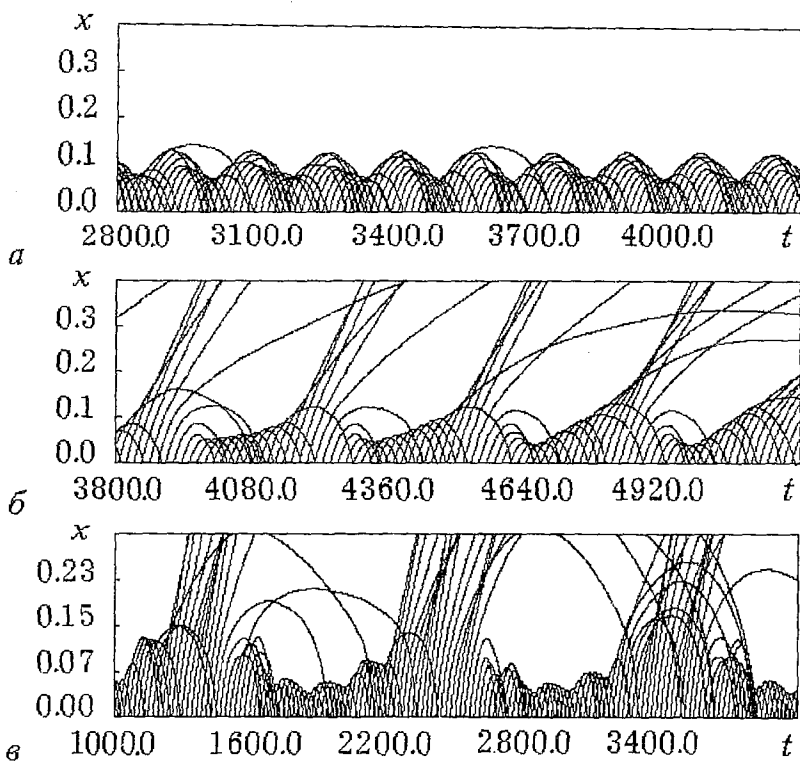


Рис. 8. Пространственно-временные диаграммы электронного потока в пространстве взаимодействия для режимов I (а); VIII (б); II (в)

колебаний в системе. Хаотическая динамика связана с появлением в потоке внутренней распределенной обратной связи. В этом случае наблюдается расслоение потока на несколько групп заряженных частиц с различным временем жизни τ в пространстве взаимодействия. Функция распределения электронов по временам жизни $\Phi(\tau)$ показана на рис. 9. Для нерегулярной динамики характерно многогорбое распределение $\Phi(\tau)$ (сплошная линия на рис. 9), где каждый пик соответствует группе электронов со своим временем жизни и собственной характерной траекторией в пространстве взаимодействия. Многогорбый вид функции распределения свидетельствует, что в потоке формируются нескольких электронных структур. Взаимодействие, связанное с обменом частиц между структурами, приводит к сложной динамике системы. При этом группа заряженных частиц с временем жизни $\tau > T_{vc}$ (T_{vc} – характерный масштаб колебаний виртуального катода) обеспечивает запаздывающую обратную связь, так как эти частицы существуют в пространстве взаимодействия более, чем в течении одного периода колебаний виртуального катода, и влияют на стартовые условия образования виртуального катода на каждом периоде колебаний.

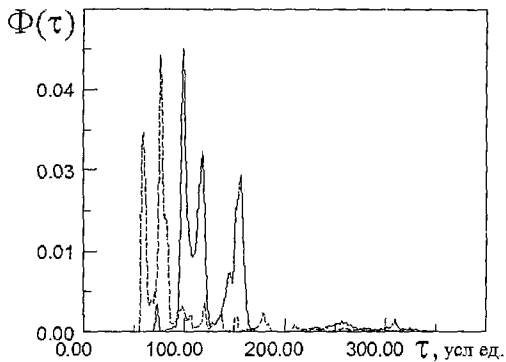


Рис. 9. Распределение заряженных частиц по временам жизни в пространстве взаимодействия для режима хаотических (сплошная линия) и регулярных (пунктирная линия) колебаний

Для количественного анализа процессов структурообразования в потоке мы выделяли внутренние

Таблица

Режим	$W_1, \%$	$W_2, \%$	$W_3, \%$	$W_4, \%$
I	36	27	16	9
V	52	18	7	6
VII	34	29	8	8
VIII	54	22	14	3

когерентные структуры с помощью разложения Карунена – Лозва [39–43]. В таблице приведены значения относительных энергий первых четырех мод для различных режимов. Из нее видно, что энергия, заключенная в колебательном движении, в хаотическом режиме распределена по модам более гладко, чем в режимах регулярных колебаний. То есть с переходом от режимов регулярных колебаний к хаотическим энергия перераспределяется от основной структуры потока (виртуального катода) к другим структурам.

При этом подавление внутренних структур в потоке за счет предварительной модуляции электронного потока (с помощью отвода части заряженных частиц, в первую очередь из группы с $\tau > T_{VC}$, к правой границе диода) обеспечивает регулярные колебания виртуального катода (рис. 8, б; соответствующие спектр и проекция аттрактора показаны на рис. 3, в). При этом функция распределения электронов по временам жизни $\Phi(\tau)$ имеет два основных пика, которые соответствуют пролетным и отраженным от виртуального катода частицам (штриховая линия на рис. 9). Видно, что вес долгоживущих частиц, осуществляющих внутреннюю обратную связь, незначителен.

Рис. 8, в иллюстрирует динамику потока в режиме с двумя характерными частотами. В этом случае на пространственно–временной диаграмме четко прослеживаются два временных масштаба: период автономных колебаний виртуального катода, определяемый плазменной частотой пучка ($\omega_0 \approx 2.5\omega_p$; оценка по результатам численного моделирования), и период внешнего воздействия $2\pi/\omega_s$, через который за счет увеличения скорости электронного потока неустойчивость в системе подавляется, а затем опять с уменьшением скорости инжектируемого потока возникает. Это приводит к достаточно длинному интервалу времени, когда в потоке существует виртуальный катод, и небольшому промежутку времени, когда наблюдается полное прохождение тока. Отметим, что в модели с модуляцией инжектируемого электронного потока синхронизация возможна только в случае, когда период внешнего воздействия больше времени T_e пролета заряженных частиц от входной плоскости до виртуального катода. При выполнении этого условия электронный поток «видит» внешнее воздействие. В противном случае можно говорить о перемодуляции электронного потока и возникновении дополнительных структур, вызванных внешним воздействием, что приводит к усложнению динамики в системе (рис. 3, ж и 4, в).

Таким образом, предварительная модуляция электронного потока со сверхкритическим током обеспечивает возможность эффективного управления колебаниями виртуального катода. При соотношении частот внешнего воздействия и собственной частоты колебаний виртуального катода как 1 : 2 и 1 : 1 в системе возможны режимы синхронизации с высоким качеством спектра. Модуляция потока обеспечивает также возможность стабильных по частоте колебаний виртуального катода при изменении тока пучка или ускоряющего напряжения, что представляет значительный практический интерес. Анализ физических процессов показывает, что режимы синхронизации связаны с подавлением роста в потоке долгоживущей электронной структуры, обеспечивающей в автономном случае распределенную обратную связь.

Модель с синхронизацией колебаний виртуального катода внешним электромагнитным сигналом

В данном случае внешний сигнал воздействует непосредственно на колебания виртуального катода в пространстве взаимодействия. Для выяснения влияния такого воздействия на динамику виртуального катода предположим, что воздействие вида

$$E_i(x=L) = A \sin(\omega_i t)$$

подается на правую границу системы. Влияние внешнего сигнала на поведение системы определяется амплитудой A и частотой внешнего воздействия ω_i .

На рис. 10 показана карта режимов на плоскости параметров $(A/E_0, \omega_i/\omega_0)$. Здесь E_0 – средняя амплитуда автономных колебаний электрического поля в области виртуального катода в точке с координатой $x/L=0.38$. Рис. 11 демонстрирует характеристики поведения системы для различных областей на бифуркационной диаграмме. Серая область на карте режимов соответствует слабозмущенным колебаниям виртуального катода. Максимальный ляпуновский характеристический показатель λ_1 , определенный с помощью алгоритма Вольфа [44], положителен ($\lambda_1=0.069$). Рост амплитуды внешнего воздействия, как и в предыдущем случае, приводит к появлению хаотического режима с двумя характерными частотами ω_0 и ω_i (темная область на карте режимов). Он характеризуется достаточно однородным аттрактором (рис. 11, а), $\lambda_1=0.044$. Заштрихованные области соответствуют движениям, которым в фазовом пространстве, соответствуют ленточные аттракторы (рис. 11, б). Локальная неустойчивость траекторий на аттракторе в этом случае существенно меньше ($\lambda_1=0.017 \div 0.018$). На фоне этих режимов с дальнейшим увеличением амплитуды A появляются клювы синхронизации (белые области на карте режимов; регулярные колебания обозначаются также как и на рис. 2). Рис. 11, в, г соответствуют

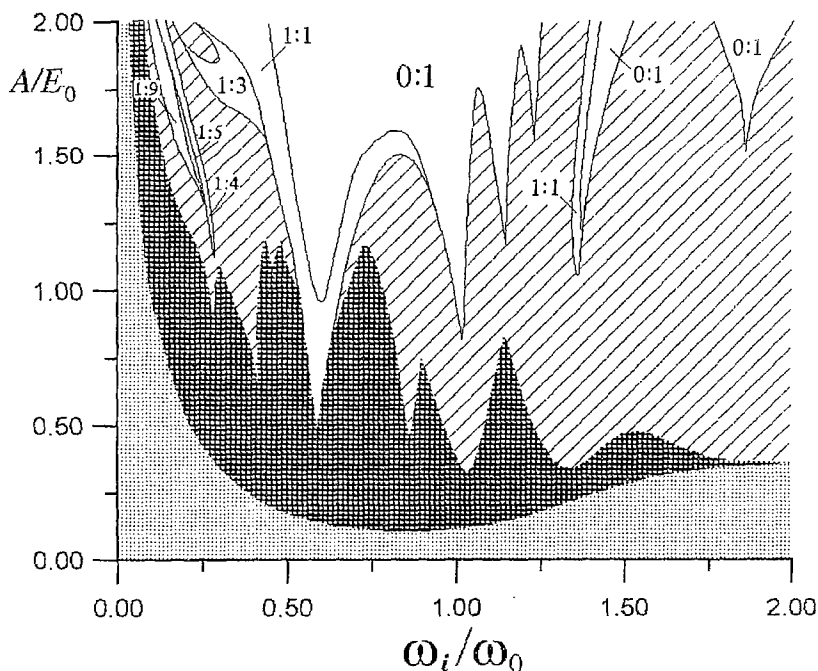


Рис. 10. Карта режимов колебаний виртуального катода для модели с электромагнитным сигналом, вводимым в пространство дрейфа

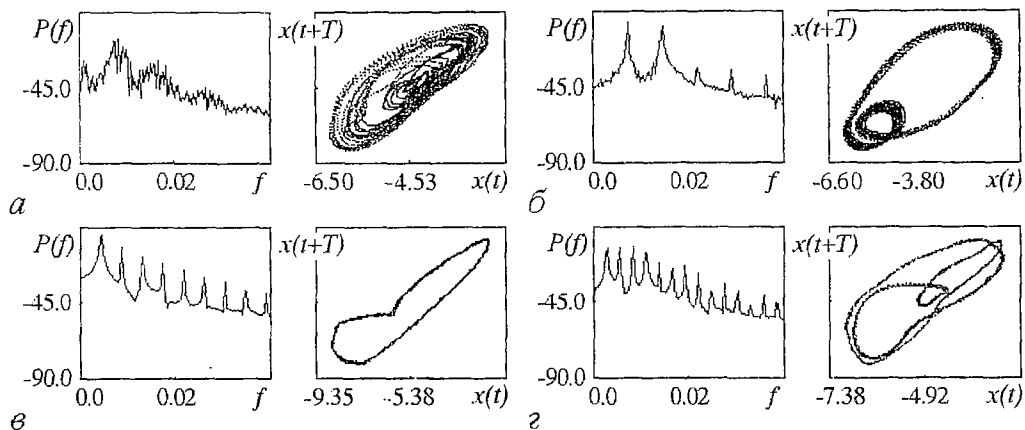


Рис. 11. Спектры мощности и фазовые портреты колебаний электрического поля в области виртуального катода для различных областей на карте режимов

движениям с одно- и трехтактным циклом. Отметим, что при $\omega_i > \omega_0$ на карте режимов существуют узкие области регулярных движений с шириной $\Delta\omega/\omega_i \approx 1\%$, не показанные на карте режимов.

На рис. 12 приведена бифуркационная диаграмма, на которой представлены максимальные значения электрического поля E в области виртуального катода, построенные в зависимости от медленно меняющейся частоты внешнего воздействия при фиксированной амплитуде внешнего воздействия $A/E_0 \approx 0.8$. Количество приращений ω_i равно 250. На каждом шаге по частоте представлено порядка 20 максимумов электрического поля. Диаграмма наглядно демонстрирует эволюцию режимов в системе с изменением частоты внешнего воздействия. Хорошо видны области одноленточных и двухленточных аттракторов. С увеличением A области, занимаемые двухленточным аттрактором, уменьшаются и при $A/E_0 \approx 2.0$ их уже не существует.

При $\omega_i > \omega_0$ выход из клювов синхронизации сопровождается режимами, представляющими собой перемежаемость [38].

Внешний электромагнитный сигнал, подаваемый в область взаимодействия, позволяет воздействовать непосредственно на потенциальный рельеф между плоскостями диода, то есть на колебания виртуального катода как «единого целого». Это позволяет синхронизировать колебания виртуального катода внешним воздействием в достаточно широком диапазоне частот внешнего воздействия, который увеличивается с ростом амплитуды внешнего воздействия. В отличие от этого модуляция инжектируемого электронного потока в пространство дрейфа не влияет на движение виртуального катода как единого образования в потоке, а позволяет управлять отдельными группами электронов («дополнительная селекция» электронного потока), исключая, например, частицы, осуществляющие внутреннюю обратную связь в потоке, за счет отвода их к коллектору (пролетный ток при этом увеличивается).

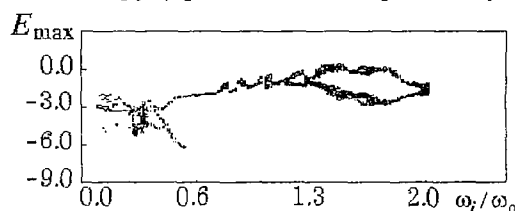


Рис. 12. Бифуркационная диаграмма колебаний электрического поля в области виртуального катода. Здесь $A/E_0 = 0.8$

В связи с таким механизмом воздействия на динамику системы в случае предварительной модуляции электронного потока управление поведением системы возможно лишь до частот внешнего воздействия ω_i , которые, как уже говорилось, удовлетворяют условию $2\pi/\omega_i > T_e$. В случае внешнего электромагнитного сигнала такого ограничения на частоту не существует.

Кратко остановимся на фазовых соотношениях между сигналами, генерируемыми в системе, и внешним воздействием. Для оценки разности фаз $\Delta\phi$ между двумя сигналами мы использовали следующую методику. В качестве опорного использовался внешний управляющий гармонический сигнал с частотой f_i . В окрестности области синхронизации генерируемый сигнал близок к регулярному и его частоту можно представить как

$$f = f_0 + \delta f(t),$$

где $f_0 = 1/T$, $\delta f \ll f_0$. Здесь T – характерный временной масштаб колебаний в системе, который в режиме синхронизации равен $1/f_i$. Тогда разность фаз между сигналами

$$\Delta\phi = 2\pi(f - f_i)t = 2\pi\delta f(t)t, \quad \text{mod}(2\pi). \quad (*)$$

Для оценки $\Delta\phi$ можно сравнивать взаимное расположение максимумов на временных реализациях сигналов, то есть выражение (*) будет определяться в дискретные моменты времени, отстоящие друг от друга на величину T . Если расстояние между максимумами в момент времени $t_k = kT$ равно l , то

$$\Delta\phi(t_k) = 2\pi l/T.$$

На рис. 13 представлены разности фаз $\Delta\phi$ между колебаниями в системе и внешним сигналом для $\Delta\omega/\omega_0 \approx 5.4\%$ (кривая 1) и $\Delta\omega/\omega_0 \approx -5.4\%$ (кривая 2). Разность фаз меняется от -40° до -60° при изменении частоты внешнего воздействия в пределах области синхронизации. Полученные результаты соответствуют результатам [9] как феноменологической теории (кривая 3), так и физического эксперимента по синхронизации виркатора сигналом релятивистского магнетрона (кривая 4). Флуктуации на кривой 4 объясняются авторами этой статьи нестабильностью электронного импульса, инжектируемого в виркатор, однако, среднее значение $\Delta\phi \approx -50^\circ$, что достаточно хорошо согласуется с численным экспериментом.

В случае модуляции электронного потока разности фаз между внешним сигналом (модуляцией) и колебаниями виртуального катода при $\Delta\omega \rightarrow 0$ также стремятся к нулю. Например, для вышеприведенного отношения ($\Delta\omega_0 \approx 5.4\%$) $\Delta\phi \approx 5^\circ$. Это делает перспективным использование виркаторов с предварительной модуляцией электронного потока в качестве модулей антенных решеток, так как суммарная мощность связанной системы будет пропорциональна $\cos\Delta\phi$. Во второй модели с внешним сигналом, подаваемым в область виртуального катода, разность фаз далека от оптимальной.

Заключение

Проведенное численное моделирование показало, что внешнее воздействие на колебания электронного потока с виртуальным катодом приводит к движениям, которые принципиально отличаются от автономных колебаний виртуального

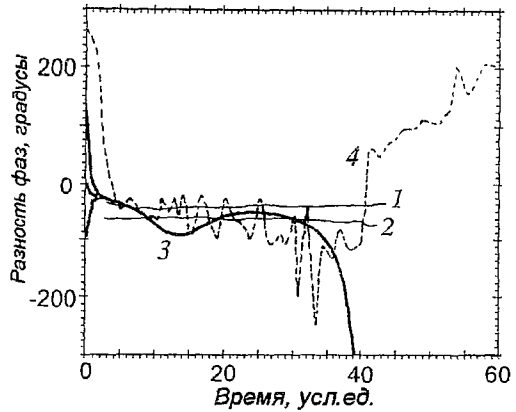


Рис. 13. Разность фаз между колебаниями в системе и внешним сигналом для различных отношений $\Delta\omega/\omega_0$ (кривые 1 и 2). Кривые 3 и 4 соответствуют результатам феноменологической теории и натурального эксперимента [9]

катода. Неавтономная система демонстрирует широкий спектр нелинейных динамических явлений, включая стохастическую синхронизацию внешними гармоническими сигналами.

Отметим, что различным видам внешнего воздействия соответствуют различные механизмы влияния на динамику системы. Модуляция электронного потока позволяет проводить дополнительную «селекцию» заряженных частиц, подавляя внутреннюю обратную связь в потоке, связанную с электронами, отраженными не в фазе от виртуального катода. Внешний электромагнитный сигнал воздействует непосредственно на форму потенциального рельефа в пространстве взаимодействия.

Предварительная модуляция электронного потока, видимо, является более перспективным путем управления или, по крайней мере, стабилизации некоторых характеристик динамики электронного потока с виртуальным катодом, что подтверждается большим интересом к приборам с модуляцией электронного потока, а именно: к виртоду [4] и виркатору–клистрону [19]. В первую очередь это связано с различными уровнями мощности управляющего сигнала (см., например, [4,9,10,17]). Дополнительный интерес к системам с модуляцией потока может быть связан с более оптимальными фазовыми соотношениями между управляющим и генерируемым сигналом (см. предпоследний раздел, а также [16]).

Полученные результаты позволяют рассматривать систему с виртуальным катодом как базовый элемент, на основе которого могут быть построены системы с большим числом степеней свободы – антенные решетки на параллельно работающих виркаторах, синхронизируемых внешними сигналами.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 96–02–16753).

Библиографический список

1. Pierce J. Limiting current in electron beam in presence of ions // J.Appl.Phys. 1944. Vol. 15, № 8. P. 721.
2. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
3. Thode L.E. // High Power Microwave Sources / Eds V.L. Granatstein and I. Alexeff. Boston: Artech House, 1987. Ch.14. P. 506.
4. 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, вып. 4. С. 530.
5. Anfinogentov V.G. Chaotic dynamics of electron beam with virtual cathode in the bounded system // Proc. of the 11th Conf. on High–Power Particle Beams. Prague, 1996. Vol. 1. P. 381.
6. Храмов А.Е. Влияние обратной связи на сложную динамику электронного потока с виртуальным катодом в виртоде // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, вып. 5. С.51.
7. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. Сложное поведение электронного потока с виртуальным катодом и генерация хаотических сигналов в виртодных системах // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61, № 12. С.2391.
8. Sze H., Price D., Woo W., Benford J. Priming and phase locking of high power vircators // Abstr. of the 7th Int. Conf. on High–Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P. 328.
9. Woo W., Benford J., Fittinghoff D., Harteneck B., Price D., Smith R., Sze H. Phase locking of high–power microwave oscillators // J.Appl.Phys. 1989. Vol. 65, № 2. P. 861.
10. 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, вып. 23. С. 2164.
11. Fazio M.V., Noeberling R.F. A reflexing electron microwave amplifier for RF

particle-accelerator applications // Proc. of the 6th Conf. on High-Power Particle Beams. Kobe, 1986. P. 569.

12. *Hramov A.E.* Influence of external action on chaotic dynamics of virtual cathode oscillations // Proc. of the 5th Int. Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic systems. Moscow, Russia, 26–27 June, 1997. P. 443.

13. *Magda I.I., Prokopenko Yu.V.* Co-operative high-power radiation of two beams at the dual vircator complex // Proc. of the 11th Conf. on High-Power Particle Beams. Prague, 1996. Vol. 1. P. 442.

14. *Hendrics K.J., Adler R., Noggle R.C.* Experimental results of phase locking two virtual cathode oscillators // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68, № 2. P. 820.

15. *Didenko A.N.* Influence of external high frequency signal on generation in the virtual cathode // Abstr. of the 7th Int. Conf. on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, 1988. P. 338.

16. *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. P. 108.

17. *Friedman M., Serlin V.* Modulation of intense relativistic electron beams by an external microwave sources // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55, № 26. P. 2860.

18. *Jiang W., Masugata K., Yatsui K.* New configuration of a virtual cathode oscillator for microwave generation // Physics of Plasmas. 1995. Vol. 2, № 12. P. 4635.

19. *Jiang W., Masugata K., Yatsui K.* High power microwave oscillator: vircator-klystron // Proc. of the 11th Conf. on High-Power Particle Beams. Prague, 1996. Vol. 1. P. 477.

20. *Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е.* Исследование хаотической динамики в активных системах на виртуальном катоде с внутренней обратной связью // Мат. науч. конф. «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ». Саратов, 4–8 сентября 1997. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1997. С. 6.

21. *Sze H., Price D., Harteneck B.* Phase locking of two strongly coupled vircators // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67, № 5. P. 2278.

22. *Anfinogentov V.G.* Nonlinear dynamics and chaotic behaviour of electron beam with virtual cathode in the Pierce diode // Proc. of the 3rd Int. Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic systems. Dublin, Ireland, 28–29 July, 1995. P. 79.

23. *Афонин А.М., Диденко А.Н., Пауткин А.Ю., Рошаль АС.* Нелинейная динамика виртуального катода в триодных системах // РЭ. 1992. Т. 37, вып. 10. С. 1889.

24. *Анфиногентов В.Г.* Хаотические колебания в электронном потоке с виртуальным катодом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 5. С. 69.

25. *Селемир В.Д., Алёхин Б.В., Ватрунин В.Е., Дубинов АЕ., 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.

26. *Anfinogentov V.G.* Influence of neutralisation degree on the complex behaviour of the electron beam with virtual cathode // Proc. of the 5th Int. Specialist Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. Moscow, Russia, 26–27 June, 1997. P. 284.

27. *Sullivan D.J., Walsh J.E., Coustias E.A.* Virtual cathode oscillator (vircator) theory // in Ref. [3], Ch.13. P. 441.

28. *Anfinogentov V.G.* Chaotic dynamics and structure formation in the plasma diode with virtual cathode // Abstr. of the 24th European Physical Society Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Berchtesgaden, Germany, 9–13 June, 1997.

29. *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics via computer simulation. N.-Y.: McGraw-Hill, 1985.

30. *Takens F.* Detecting strange attractors in turbulence // Lect. Notes in Math. Warwick: Springer-Verlag, 1980. Vol. 898. P. 366.

31. *Grassberger P., Procaccia I.* Characterization of strange attractors // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50, № 5. P. 364.

32. Кипчатов А.А., Красичков Л.В., Андрушкевич А.В. Диагностика сложных колебаний по корреляционной размерности // Тр. междунар. семинара «Нелинейные цепи и системы». Москва, Россия, 16–18 июня, 1992. Т. 2. С. 308.
33. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
34. Березин Ю.А., Вишивцов В.А. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск: Наука, 1983.
35. Morey I.J., Birdsall C.K. Travelling-wave-tube simulation: the IBC code // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1990. Vol. 18, № 3. P. 482.
36. Диденко А.Н., Рациков В.И. Физика плазмы. 1992. Т. 18, № 9. С.1182.
37. Kadish A., Faehl R.J., Snell C.M. // Phys. Fluids. 1986. Vol.29, № 12. P.4192.
38. Manneville P., Pomeau J. Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems // Physica 1D. Moscow: Nauka, 1980. P. 219.
39. Ватанабе С. Разложение Карунена – Лозва и факторный анализ. Теория и приложения // Автоматический анализ сложных изображений / Под ред. Э.М. Бравермана. М.: Мир, 1969. С.310.
40. Lumley J.L. The structure of inhomogeneous turbulent flows // Atmospheric Turbulence and Radio Wave Propagation: Proc. of the Int. Colloquium / Eds A.M. Yaglom and V.I. Tatarsky. Moscow: Nauka, 1967. P. 166.
41. Анфиногентов В.Г. Взаимодействие когерентных структур и хаотическая динамика в электронном потоке с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21, вып. 8. С. 70.
42. Храмов А.Е. Сложная динамика когерентных структур в двухпотоковом виркаторе // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т. 6, № 2 (в печати).
43. Aubry N., Holmes P., Lumley J., Stone E. Application of dynamical system theory to coherent structures in the wall region // Physica D. 1989. Vol. 37. P. 1.
44. Wolf A., Swift J., Swinney H.L., Vastano J. Determining Lyapunov exponents from time series // Physica D. 1989. Vol. 16. P. 285.

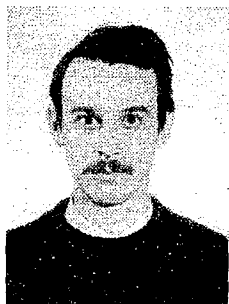
Саратовский государственный
университет

Поступила в редакцию 22.12.97
после переработки 26.02.98

NONAUTONOMOUS OSCILLATIONS OF ELECTRON BEAM WITH VIRTUAL CATHODE IN THE PLANAR DIODE REGION

V.G. Anfinogentov, A.E. Hramov

The influence of external action on the oscillations of electron beam with virtual cathode in the planar diode is investigated. The results of numerical simulations are shown for model with modulated electron beam and model with action of external signal on the virtual cathode oscillation. It is shown that system demonstrates different nonlinear oscillations, including deterministic chaos and synchronization regimes. Features of both types of external action are considered and it is shown that modulation is the most effective method of control of the virtual cathode oscillation. The investigation of physical processes in the system demonstrates appearance of complex behaviour as a result of structure interaction in the beam. Synchronization regimes are connected with suppression of structure growth. Phase correlations between external signal and virtual cathode oscillations obtained from numerical simulations and physical experiments are in the good agreement.



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.



Храмов Александр Евгеньевич – в 1996 году закончил Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. В настоящее время работает в НИИ механики и физики СГУ. Работает в научном секторе Государственного учебно-научного центра «Колледж» СГУ. Область научных интересов – нелинейные явления и процессы структурообразования в распределенных системах электронно-плазменной природы, мощная СВЧ электроника.